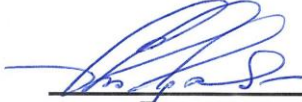

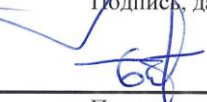


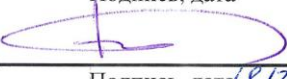
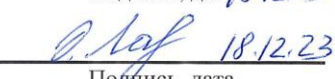




## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

### СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

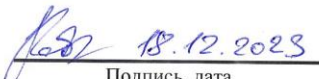
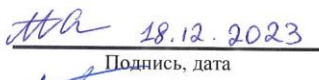






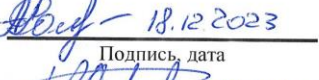




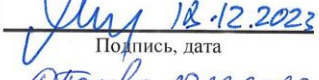
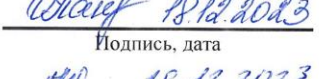
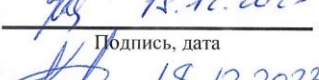
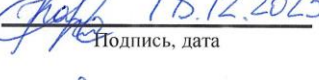
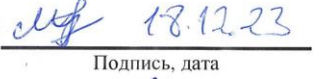

Руководитель темы, Зав отделом, докт. техн. наук	 Подпись, дата 18.12.23	Е.А.Лупян (раздел 1–8, введение, заключение)
Ответственный исполнитель, Зав отделом, докт. техн. наук	 Подпись, дата 18.12.23	Е.А.Лупян (раздел 1,3,6-8)
Ответственный исполнитель, главный научный сотрудник, д.т.н. , профессор	 Подпись, дата 18.12.23	С.А. Баргалеv (раздел 2,7)
Ответственный исполнитель, зав. отд., д.ф.-м.н.	 Подпись, дата 18.12.2023	Д.М. Ермаков (раздел 3,4,5,6)
Ответственный исполнитель, зав.лаб., к.ф.-м.н.	 Подпись, дата 18.12.23	С.Н. Артеха (раздел 5)
Ответственный исполнитель, гл. конструктор проекта	 Подпись, дата 18.12.23	И.В. Полянский (раздел 6)
Ответственный исполнитель, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.	 Подпись, дата 18.12.23	О.Ю. Лаврова (раздел 4,7)

## Исполнители отдела 56

Исполнители отдела 56








ведущий научный сотрудник, к.т.н.	<u>Егоров 18.12.23</u> Подпись, дата	В.А. Егоров (раздел 2)
ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.	<u>Мазуров 18.12.23</u> Подпись, дата	А.А. Мазуров (раздел 1, 6)
ведущий научный сотрудник, к.т.н.	<u>Прошин 18.12.23</u> Подпись, дата	А.А. Прошин (раздел 1)
заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.	<u>Пырков 18.12.23</u> Подпись, дата	В.Н. Пырков (раздел 1)
старший научный сотрудник, зав. лаб., к.т.н.	<u>Балашов 18.12.23</u> Подпись, дата	И.В. Балашов (раздел 1, 8)
старший научный сотрудник, зав. лаб., к.т.н.	<u>Бурцев 18.12.2023</u> Подпись, дата	М.А. Бурцев (раздел 1)
старший научный сотрудник, зав. сектором, к.ф.-м.н.	<u>Плотников 18.12.2023</u> Подпись, дата	Д.Е. Плотников (раздел 2, 7)
старший научный сотрудник, к.т.н.	<u>Кашницкий 18.12.2023</u> Подпись, дата	А.В. Кашницкий (раздел 1)
старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	<u>Крашенинникова 18.12.2023</u> Подпись, дата	Ю.С. Крашенинникова (раздел 1)
старший научный сотрудник, д.т.н.	<u>Руткевич 18.12.2023</u> Подпись, дата	П.Б. Руткевич (раздел 1, 5)
старший научный сотрудник, к.т.н.	<u>Стыценко 18.12.2023</u> Подпись, дата	Ф.В. Стыценко (раздел 2)
старший научный сотрудник, к.т.н.	<u>Толпин 18.12.2023</u> Подпись, дата	В.А. Толпин (раздел 1)
старший научный сотрудник, к.т.н.	<u>Уваров 18.12.23</u> Подпись, дата	И.А. Уваров (раздел 1)
старший научный сотрудник, к.т.н.	<u>Хвостиков 18.12.23</u> Подпись, дата	С.А. Хвостиков (раздел 2)
старший научный сотрудник, к.г.н.	<u>Шабанов 18.12.23</u> Подпись, дата	Н.В. Шабанов (раздел 2)
старший научный сотрудник, к.с.-х.н.	<u>Шинкаренко 18.12.23</u> Подпись, дата	С.С. Шинкаренко (раздел 2)
научный сотрудник, к.ф.-м.н.	<u>Жарко 18.12.23</u> Подпись, дата	В.О. Жарко (раздел 2)
научный сотрудник, к.т.н.	<u>Златопольский 18.12.2023</u> Подпись, дата	А.А. Златопольский (раздел 1)



научный сотрудник, к.т.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	Д.А. Кобец (раздел 1, 7)
научный сотрудник, к.т.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	Т.С. Ховратович (раздел 2)
младший научный сотрудник	 18.12.2023 Подпись, дата	А.А. Бриль (раздел 1, 6)
младший научный сотрудник	 18.12.2023 Подпись, дата	Т.С. Миклашевич (раздел 2)
младший научный сотрудник, к.т.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	А.М. Константинова (раздел 1)
главный специалист	 18.12.2023 Подпись, дата	А.Ю. Дегай (раздел 1)
главный специалист, к.ф.-м.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	А.А. Козочкина (раздел 1, 7)
ведущий специалист, д.т.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	Л.А. Ведешин (раздел 1, 7)
ведущий специалист, д.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	А.А. Романов (раздел 1)
ведущий специалист, к.т.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	В.П. Саворский (Раздел 1)
ведущий конструктор, к.х.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	З.С. Белоконь (раздел 1)
ведущий конструктор, к.т.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	Д.В. Ершов (раздел 2)
Ведущий конструктор, к.г.н.	 18.12.2023 Подпись, дата	Н.Н. Ладонина (раздел 2)
ведущий конструктор.	 18.12.2023 Подпись, дата	В.В. Марченков (раздел 1)
ведущий конструктор	 18.12.2023 Подпись, дата	О.Ю. Панова (раздел 1)
ведущий инженер	 18.12.2023 Подпись, дата	Ю.В. Артамонова (раздел 1)
ведущий инженер	 18.12.2023 Подпись, дата	П.А. Колбудаев (раздел 1)
ведущий инженер	 18.12.23 Подпись, дата	А.М. Матвеев (раздел 1)
ведущий инженер	 18.12.2023 Подпись, дата	М.В. Радченко (раздел 1, 7)





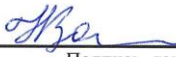

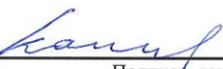



ведущий инженер	<u>Романова 18.12.2023</u> Подпись, дата	Л.В. Романова (раздел 1)
ведущий инженер	<u>Суднева 18.12.2023</u> Подпись, дата	О.А. Суднева (раздел 1)
ведущий инженер, к.т.н.	<u>Стыценко 18.12.2023</u> Подпись, дата	Е.А. Стыценко (раздел 2)
инженер, к.т.н.	<u>Андреев 18.12.2023</u> Подпись, дата	М.В. Андреев (раздел 1)
инженер	<u>Антошкин 18.12.2023</u> Подпись, дата	А.А. Антошкин (раздел 1)
инженер	<u>Богодухов 18.12.2023</u> Подпись, дата	М.А. Богодухов (раздел 2)
инженер	<u>Бушмелева 18.12.2023</u> Подпись, дата	Е.В. Бушмелева (раздел 1)
инженер	<u>Волкова 18.12.2023</u> Подпись, дата	Е.Е. Волкова (раздел 1)
инженер	<u>Ворушилов 18.12.2023</u> Подпись, дата	И.И. Ворушилов (раздел 2)
инженер	<u>Врублевский 18.12.2023</u> Подпись, дата	М.В. Врублевский (раздел 1)
инженер	<u>Денисов 18.12.2023</u> Подпись, дата	П.В. Денисов (раздел 1)
инженер	<u>Дианова 18.12.2023</u> Подпись, дата	Д.С. Дианова (раздел 1, 7)
инженер	<u>Ёлкина 18.12.2023</u> Подпись, дата	Е.С. Ёлкина (раздел 2)
инженер	<u>Лозин 18.12.2023</u> Подпись, дата	Д.В. Лозин (раздел 3, 6, 8)
инженер	<u>Матвеев 18.12.2023</u> Подпись, дата	А.М. Матвеев (раздел 2)
инженер	<u>Полецкая 18.12.2023</u> Подпись, дата	А.Ю. Полецкая (раздел 1)
инженер	<u>Рузаков 18.12.2023</u> Подпись, дата	Б.И. Рузаков (раздел 1)
инженер	<u>Руткевич 18.12.2023</u> Подпись, дата	Б.П. Руткевич (раздел 1)
инженер	<u>Сайгин 18.12.2023</u> Подпись, дата	И.А. Сайгин (раздел 2)

инженер	 18.12.2023 Подпись, дата	К.С. Сенько (раздел 1)
инженер	 18.12.2023 Подпись, дата	В.М. Сидоренков (раздел 2)
инженер, к.г.н	 18.12.2023 Подпись, дата	К.А. Трошко (раздел 1)
инженер	 18.12.2023 Подпись, дата	В.Н. Черных (раздел 1)
техник	 18.12.2023 Подпись, дата	Д.Л. Пчеловодов (раздел 1)
старший лаборант	 18.12.2023 Подпись, дата	О.Е. Степанченко (раздел 1)
старший лаборант	 18.12.2023 Подпись, дата	Д.А. Юдин (раздел 1, 7)

## Исполнители отдела 51

### Исполнители отдела 51


ведущий научный сотрудник, д.н.	 Подпись, дата	18.12.2023	Е.Б. Кудашев (разделы 5.2.1)
старший научный сотрудник, к.н.	 Подпись, дата	18.12.2023	А.А. Гусев (раздел 5.4)
старший научный сотрудник, к.н.	 Подпись, дата	18.12.2023	Г.В. Левина (раздел 5.2.2)
старший научный сотрудник	 Подпись, дата	18.12.2023	С.Л. Шалимов (раздел 5.1.2)
научный сотрудник, к.н.	 Подпись, дата	18.12.2023	Н.Н. Зольникова (раздел 5.2.3)
младший научный сотрудник, к.н.	 Подпись, дата	18.12.2023	Л.А. Михайловская (раздел 5.2.3)
главный специалист	 Подпись, дата	18.12.2023	Н.И. Каленова (раздел 5.2.1)
ведущий математик	 Подпись, дата	18.12.2023	Н.М. Астафьева (раздел 5.2.4)



## Исполнители отдела 55


### Исполнители отдела 55

главный научный  
сотрудник, д.н.

 18.12.23  
Подпись, дата


Е.А. Шарков  
(раздел 3,5)

ведущий научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.23  
Подпись, дата


Г.П. Арумов  
(раздел 5)

ведущий научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.23  
Подпись, дата

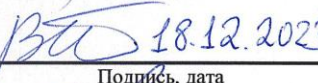
А.В. Кузьмин  
(раздел 3,4,5,6)

ведущий научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.23  
Подпись, дата

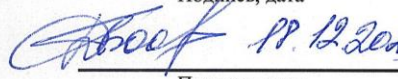
М.Д. Раев  
(раздел 3)

ведущий научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.2023  
Подпись, дата


В.В. Тихонов  
(раздел 3)

старший научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.2023  
Подпись, дата

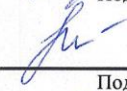
Д.А. Боярский  
(раздел 3)

старший научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.2023  
Подпись, дата

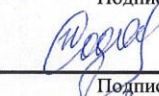
А.В. Бухарин  
(раздел 5)

старший научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.23  
Подпись, дата

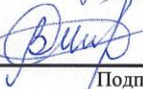
М.И. Митягина  
(раздел 4,7)

старший научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.23  
Подпись, дата

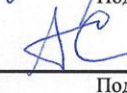
И.Н. Садовский  
(раздел 3,4,5,6)

старший научный  
сотрудник, д.н.

 18.12.23  
Подпись, дата

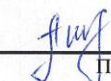
В.В. Стерлядкин  
(раздел 3,4)

старший научный  
сотрудник, к.н.

 18.12.23  
Подпись, дата


А.Я. Строчков  
(раздел 4,7)

научный сотрудник, к.н.

 18.12.23  
Подпись, дата

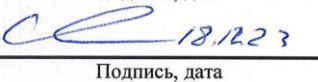
Т.А. Алексеева  
(раздел 3)

научный сотрудник

 18.12.23  
Подпись, дата


Т.Ю. Бочарова  
(раздел 4,7)

научный сотрудник

 18.12.23  
Подпись, дата

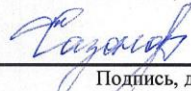
А.Н. Ляш  
(раздел 5)

научный сотрудник, к.н.




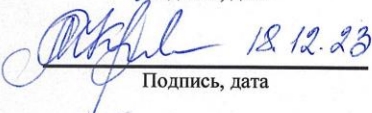

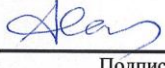






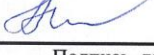




 18.12.23  
Подпись, дата

Е.В. Пашинов  
(раздел 3,4,5,6)

научный сотрудник, к.н.


 18.12.23  
Подпись, дата

Д.С. Сазонов  
(раздел 3,4,5,6)

младший научный сотрудник	 Подпись, дата	18.12.23 Е.В. Краюшкин (раздел 1, 4)
главный специалист	 Подпись, дата	18.12.2023 Н.Ю. Комарова (раздел 3,7)
главный специалист	 Подпись, дата	18.12.23 М.Ю. Русаков (раздел 4)
ведущий специалист	 Подпись, дата	18.12.23 М.А. Кузнецова (раздел 3)
ведущий программист	 Подпись, дата	18.12.23 С.А. Втюрин (раздел 3,4,5)
ведущий математик	 Подпись, дата	18.12.23 А.Б. Селунский (раздел 3,5)
ведущий математик	 Подпись, дата	18.12.23 А.В. Тюрин (раздел 3)
ведущий инженер	 Подпись, дата	18.12.23 Е.В. Афанасьева (раздел 3)
ведущий инженер	 Подпись, дата	18.12.23 А.А. Горшков (раздел 3,4)
ведущий инженер	 Подпись, дата	18.12.23 Т.В. Ликучева (раздел 7)
ведущий инженер	 Подпись, дата	18.12.23 М.Т. Смирнов (раздел 6)
ведущий инженер	 Подпись, дата	18.12.23 Ю.В. Соколова (раздел 3)
инженер	 Подпись, дата	18.12.23 Т.С. Арищенко (раздел 7)
инженер	 Подпись, дата	18.12.23 Д.А. Елизаров (раздел 1)
инженер	 Подпись, дата	18.12.23 Н.А. Князев (раздел 1,4,7)
инженер	 Подпись, дата	18.12.23 Е.В. Полякова (раздел 3)
инженер	 Подпись, дата	18.12.23 А.Ю. Баданов (раздел 3,5)

электроник  18.12.23 В.С. Антонов  
Подпись, дата (раздел 4)


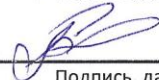





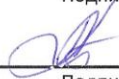






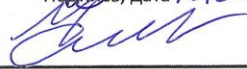


техник  18.12.23 Е.М. Марцинкевич  
Подпись, дата (раздел 6)












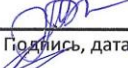
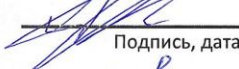

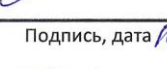
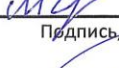
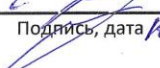
техник  18.12.23 А.В. Суров  
Подпись, дата (раздел 6)



## Исполнители отдела 57

Исполнители отдела 57		
зав отдела, д.н.	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Р.В. Бессонов (раздел 6)
главный научный сотрудник, д.н.	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Г.А. Аванесов (раздел 6)
ведущий научный сотрудник, к.н.	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Н.Н. Брысин (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 <hr/> Подпись, дата 16.12.23	С.В. Воронков (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Б.С. Жуков (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 <hr/> Подпись, дата 16.12.23	Т.В. Кондратьева (раздел 6)
старший научный сотрудник, к.н.	 <hr/> Подпись, дата 16.12.23	А.В. Никитин (раздел 6)
научный сотрудник	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	П.С. Сметанин (раздел 6)
научный сотрудник	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Н.А. Строилов (раздел 6)
младший научный сотрудник	 <hr/> Подпись, дата 16.12.23	С.А. Прохорова (раздел 6)
младший научный сотрудник	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Я.Д. Эльяшев (раздел 6)
младший научный сотрудник	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Б.А. Юматов (раздел 6)
главный конструктор проекта	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	Т.Ю. Дроздова (раздел 6)
главный конструктор проекта	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	В.М. Муравьев (раздел 6)
главный конструктор проекта	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	М.И. Куделин (раздел 6)
главный специалист	 <hr/> Подпись, дата 18.12.23	А.В. Бережков (раздел 6)
главный специалист	 <hr/> Подпись, дата 16.12.23	Р.В. Гордеев (раздел 6)

главный специалист	 Подпись, дата 18.12.23	А.А. Крупин (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	В.Ю. Белов (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	Е.В.Зарецкая (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	Е.А. Соловьева (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	Э.А. Суханова (раздел 6)
ведущий конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	И.Н. Турчанинова (раздел 6)
ведущий инженер	 Подпись, дата 18.12.23	Е.В. Белинская (раздел 6)
ведущий инженер	 Подпись, дата 18.12.23	Е.В. Коломеев (раздел 6)
ведущий инженер	 Подпись, дата 18.12.23	Е.Б. Краснопевцева (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	В.Ю. Дементьев (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	И.М.Койдан (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	А.А. Курячая (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	Т.Н. Парамонова (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	Л.М. Суворова (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	В.Д. Устинов (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	В.Е. Шевелев (раздел 6)
конструктор	 Подпись, дата 18.12.23	Н.Г. Ширшова (раздел 6)

конструктор	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Е.В. Ядвичук (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Н.Ф. Абрамов (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Е.А.Базина (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Н.А.Бутюгин (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Н.А. Галкина (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	А.В. Гусева (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	А.А. Кобелева. (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	И.В. Кондратьев (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	К.П. Любченко (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	С.Н. Ромашин (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Т.А. Суворова (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Ю.П. Теремок (раздел 6)
инженер	 _____ Подпись, дата 18.12.23	А.А. Черенков (раздел 6)
программист	 _____ Подпись, дата 18.12.23	М.В. Ваваев (раздел 6)
программист	 _____ Подпись, дата 18.12.23	А.С. Лискив (раздел 6)
программист	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Е.А. Мысник (раздел 6)
программист	 _____ Подпись, дата 18.12.23	Д.И. Хорохорин (раздел 6)



## Исполнители отдела Ц90

Исполнители отдела Ц90

Старший лаборант

  
Подпись, дата 18.12.2023

П.Д. Жаданова  
(раздел 7)

нормоконтролер

  
Подпись, дата 18.12.2023

Е.А. Лупян

## **РЕФЕРАТ**

Отчёт 232 стр., 135 рис., 159 источников.

НАСТОЯЩИЙ ОТЧЁТ ПОСВЯЩЁН ОПИСАНИЮ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ, ПОЛУЧЕННЫХ В 2023 ГОДУ В РАМКАХ ТЕМЫ «МОНИТОРИНГ» (№ 122042500031-8), ВЫПОЛНЯЮЩЕЙСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ ИНСТИТУТОМ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. В ОТЧЁТЕ ПРИВОДЯТСЯ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ, ЗАПЛАНИРОВАННЫХ НА 2023 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 к организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач, в том числе автоматизированной обработки спутниковых данных .....	24
1.1.1 Анализ возможностей адаптации технологий мониторинга пожаров по данным MODIS к данным VIIRS .....	24
1.1.2 Система совместного анализа временных рядов наблюдений вулканической активности по данным низкоорбитальных и геостационарных спутников .....	27
1.1.3 Создание системы для распределенной работы с данными альтиметрии в интересах мониторинга внутренних водоёмов .....	29
1.1.4 Широкомасштабная оценки привязки продуктов VIIRS (SNPP) на основе спутниковых данных MSI (Sentinel-2) .....	32
1.1.5 Развитие методов радарно-оптического синтезирования спутниковых данных для восстановления серий безоблачных дистанционных характеристик растительного покрова высокого пространственного и временного разрешения с использованием методов машинного обучения.....	35
1.2 Создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования.....	40
1.2.1 Развитие объединенной системы работы с данным центров НИЦ «Планета» .....	40
1.2.2 Развитие методов спутникового картографирования многолетней динамики использования пахотных земель на основе восстановленных временных серий данных Landsat (на примере Амурской области) .....	42
1.2.3 Выделение пахотных земель на основе анализа устойчивых особенностей внутрисезонной динамики наземного покрова в различные годы.....	47
1.2.4 Разработка автоматизированной системы совместного анализа спутниковых и статистических данных для оценки урожайности сельскохозяйственных культур.....	49
1.2.5 Метод получения информации о местах произрастания сельскохозяйственных культур на основе хода индекса NDVI на поле .....	51
1.2.6 Результаты исследования эффективности разносезонной информации для спутникового картографирования озимых культур в весенне-летний период вегетации.....	53
1.3 Поддержка (включая формирование и ведение сверхбольших архивов спутниковых данных и результатов их обработки) и развитие ЦКП ИКИ-Мониторинг для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений, в том числе решения междисциплинарных задач .....	56
1.3.1 Текущие задачи ЦКП и их актуальность .....	56



1.3.2 Структура и технические возможности ЦКП и их развитие в 2023 году.....	57
1.3.3 Архивы спутниковых данных и их наполнение в 2023 году .....	58
1.3.4 Основные информационные продукты, предоставляемые ЦКП.....	60
1.3.5 УНУ «Вега-Science» и развитие её в 2023 году .....	61
1.3.6 Научные и прикладные информационные системы, использовавшие возможности ЦКП в 2023 году .....	62
1.3.7 Пользователи ЦКП.....	64
1.3.8 Научные проекты, выполняемые с использованием возможностей ЦКП «ИКИ- Мониторинг» в 2023 году.....	65
1.3.9 Основные публикации, при подготовке которых были использованы возможности ЦКП.....	66
1.3.10 Анализ текущих особенностей и возможных направлений развития ЦКП «ИКИ- Мониторинг» .....	67
1.3.10.1 Текущие особенности развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг».....	67
1.3.10.2 Возможные перспективные направления развития ЦКП «ИКИ- Мониторинг».....	67
Заключение .....	68
РАЗДЕЛ 2 МОНИТОРИНГ-БИОСФЕРА .....	69
Введение .....	69
2.1 Развитие научных основ и методов обработки временных рядов мультисенсорных данных ДЗЗ различного пространственного и временного разрешения для обеспечения долговременного мониторинга наземных экосистем .....	69
2.1.1 Исследование возможностей картографирования наземных экосистем России на основе данных прибора VIIRS .....	69
2.1.2 Исследование возможностей дистанционной оценки сезонных и многолетних изменений площадей подвижных песков и дефлированных территорий для решения задач мониторинга опустынивания .....	73
2.2 Развитие методов обработки данных ДЗЗ для получения устойчивых нормализованных наборов и долговременных рядов данных для изучения наземных экосистем .....	76
2.2.1 Развитие подходов к картографированию структурных характеристик пастбищной растительности с применением временных рядов спутниковых данных Sentinel-2 и MODIS .....	76
2.3 Развитие методов дистанционного мониторинга динамики наземных экосистем с использованием физических и эколого-математических моделей.....	78
2.3.1 Разработка подходов к оценке чистой первичной продукции растительного покрова наземных экосистем России с использованием спутниковых данных ДЗЗ.....	78
2.3.2 Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных информационных продуктов, полученных по спутниковым данным ДЗЗ.....	82
2.3.3 Пространственное моделирование распределения открытых песков и дефлированных под влиянием антропогенных нагрузок территорий для мониторинга процессов опустынивания .....	90

2.4	Формирование и анализ многолетних рядов наблюдений наземных экосистем для исследования глобальных изменений, решения задач устойчивого развития .....	94
2.4.1	Картографирование сорных понижений и солончаков на основе многолетних данных Landsat для совершенствования методов спутникового мониторинга процессов опустынивания.....	94
2.4.2	Исследование изменений границ произрастания древесно-кустарниковой растительности (ДКР) на территории РФ на основе временного ряда спутниковых данных MODIS за период 2001-2022 годов .....	98
	Заключение .....	100
РАЗДЕЛ 3 МОНИТОРИНГ-КЛИМАТ .....		102
	Введение .....	102
3.1	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, для изучения климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Земли, а также крупномасштабных погодно-климатических колебаний типа муссонов, явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья .....	102
3.1.1	Исследование характеристик муссона близ Индии в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров.....	102
3.2	Развитие методов дистанционной диагностики процессов, протекающих в криосфере Земли, в том числе исследование сезонной и многолетней динамики северной полярной шапки, анализ состояния пресноводных акваторий в период ледостава, определение характеристик замерзающих водно-болотных угодий для изучения климатических и экологических изменений арктических и субарктических территорий.....	105
3.2.1	Разработка модели собственного микроволнового излучения устьевых областей арктических рек с учётом попадания в пиксель радиометра поверхности суши	105
3.2.2	Анализ использования данных космической радиолокационной съёмки при решении задачи автоматизации ледового картирования .....	114
3.3	Развитие методов и подходов мониторинга и прогноза крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений .....	120
3.3.1	Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе комплексных данных различных спутниковых систем .....	120
3.3.2	Оценка возможности построения подходов объективной оценки горимости лесов в регионах с различными условиями на примере предварительного анализа горимости лесов Российской Федерации в пожароопасном сезоне 2023 года по данным дистанционного мониторинга .....	123
3.3.3	Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения .....	128
3.3.4	Детектирование атмосферных рек по данным спутникового радиотепловидения	132
3.3.5	Мониторинг катастрофических гидрологических событий на основе разновременных данных дистанционного зондирования Земли .....	135
	Заключение .....	139
РАЗДЕЛ 4 МОНИТОРИНГ-ОКЕАН .....		141

Введение .....	141
4.1 Исследования нелинейной динамики морского волнения методами спутниковой радиополяриметрии для экологического мониторинга морских акваторий .....	141
4.1.1 Экспериментальные исследования статистических связей приводного ветра с оптическими и микроволновыми характеристиками морской поверхности на Черноморском гидрофизическом полигоне .....	141
4.2 Разработка научных основ совместного использования новейших радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий. ....	143
4.2.1 Горизонтальная тонкая структура течения речных вод в дельте Волги по спутниковым данным высокого пространственного разрешения.....	143
4.2.2 Изменение параметров плюма реки Сулак (Каспийское море) после схода селевых потоков в горах Дагестана: спутниковые наблюдения и измерения in situ	146
4.2.3 Комплексное использование спутниковых данных для мониторинга экологического состояния вокруг разведывательной буровой платформы в Карском море в июле – октябре 2023 г.....	147
4.2.4 Развитие методических основ диагностики плёночных загрязнений морской поверхности по данным спутникового дистанционного зондирования в оптическом и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра.....	150
4.3 Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оценки параметров процессов в верхнем слое океана и в приводном слое атмосферы .....	152
4.3.1 Апробация методов выявления пространственной и временной изменчивости траекторий естественных нефтепроявлений на морской поверхности Южного Каспия на основе многолетних рядов данных спутникового дистанционного зондирования.....	152
4.3.2 Апробация методов выявления пространственной и временной изменчивости субмезомасштабных вихревых процессов в оз. Севан на основе многолетних рядов данных спутникового дистанционного зондирования .....	155
Заключение .....	157
РАЗДЕЛ 5 МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА .....	158
Введение .....	158
5.1 Разработка научных основ и методов анализа временных серий спутниковых многосенсорных наблюдений, исследований и мониторинга атмосферных явлений	158
5.1.1 Исследование регионального гидрологического баланса на основе технологий и систем спутникового мониторинга .....	158
5.1.2 Воздействие внутренних гравитационных волн на ионосферу во время активной стадии тропического циклона.....	160
5.1.3 Восстановление интенсивности осадков по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ.....	160
5.2 Развитие моделей и методов анализа данных для мониторинга и прогноза состояния атмосферы, в т.ч. мощных вихревых структур с учетом ветровых потоков, фазовых переходов влаги, атмосферного электричества, вариаций космических лучей .....	162
5.2.1 Тепловая помеха при регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства .....	162



5.2.2	Спиральный циклогенез как экстремальное пороговое явление во вращающейся стратифицированной влажной атмосфере.....	162
5.2.3	Влияние глобального потепления на изменение климата в юго-западной зоне Чёрного моря и малопараметрическая нелинейная модель тропического циклогенеза.....	163
5.2.4	Модель генерации ограниченного в пространстве вихря в стратифицированной неустойчивой атмосфере.....	164
5.2.5	Развитие процедур автоматического детектирования, локализации центров и восстановления интенсивности тропических циклонов по спутниковым изображениям.....	164
5.3	Разработка новых методов обработки данных дистанционных наблюдений в ИК и видимом диапазоне и лидарных наблюдений облачности.....	166
5.3.1	Разработка методов определения концентрации частиц в модельном рассеивающем слое для лидара упругого рассеяния.....	166
5.4	Исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов.....	167
5.5	Развитие методик решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы по данным ДЗЗ с использованием нейронных сетей.....	168
5.5.1	Нейросетевой подход к восстановлению общего содержания влаги в атмосфере над разными типами подстилающей поверхности (океан, суша).....	168
	Заключение.....	170
РАЗДЕЛ 6 МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ.....		172
	Введение.....	172
6.1	Развитие методов построения, управления и калибровки перспективных российских приборов наблюдения Земли.....	172
6.1.1	Разработка методов и алгоритмов автоматической полетной геометрической калибровки Комплексов многозональной спутниковой съемки КМСС.....	173
6.1.2	Разработка методики и проведение полетной радиометрической калибровки приборов КМСС.....	178
6.1.3	Сведение лучей визирования высокочастотных каналов МТВЗА-ГЯ.....	180
6.1.4	Развитие программных средств обработки данных измерений радиометра-спектрометра Р22М.....	183
6.2	Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса, в том числе потоковой обработки.....	184
6.2.1	Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса, в том числе вопросов связанных с глобальными процессами.....	184
6.2.2	Детектирование пожаров по данным МСУ-МР на основе алгоритма MOD14... 186	186
6.2.3	Отработка процедуры автоматического контроля корректности работы МТВЗА-ГЯ.....	189
6.2.4	Анализ возможностей использования космической системы «Арктика-М» для мониторинга природных пожаров на примере анализа данных 2023 года.....	191

6.2.5 Оценка пространственных трендов точности атмосферной коррекции КМСС-2 для территории северной Евразии.....	195
Заключение.....	197
РАЗДЕЛ 7 МОНИТОРИНГ-ИНФРАСТРУКТУРА.....	199
Введение .....	199
7.1 Проведение ежегодной международной конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ( <a href="http://conf.rse.geosmis.ru/">http://conf.rse.geosmis.ru/</a> ) .....	199
7.2 Проведение научных семинаров и школ-конференций по фундаментальным проблемам ДЗЗ из космоса .....	201
7.2.1 Проведение ежегодной международной научной школы-конференции молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса ( <a href="http://conf.rse.geosmis.ru/">http://conf.rse.geosmis.ru/</a> ).....	201
7.2.2 Проведение Всероссийского семинара «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ( <a href="http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=814">http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=814</a> ) .....	202
7.3 Выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ( <a href="http://jr.rse.cosmos.ru/">http://jr.rse.cosmos.ru/</a> ).....	204
7.4 Подготовка и повышение квалификации кадров на базе НОЦ ИКИ РАН .....	207
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».....	207
7.4.2 Кафедра «Технологий дистанционного зондирования» Факультета космических исследований МГУ им М.В. Ломаносова.....	208
7.4.3 Научно-образовательные конференции .....	208
Заключение.....	208
РАЗДЕЛ 8 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИКИ РАН .....	209
8.1 Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа спутниковых данных об интенсивности горения.....	209
РАЗДЕЛ 10 ГРАНТЫ ПО НАПРАВЛЕНИЮ МОНИТОРИНГ .....	210
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	211
ПУБЛИКАЦИИ .....	212

## 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 № 122042500031-8).

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

- **«Мониторинг-Технологии»** — Развитие научных основ, методов, технологий и систем ДЗЗ, включая поддержку работы и развитие Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (ЦКП «ИКИ-Мониторинг», <http://ckp.geosmis.ru/>).
- **«Мониторинг-Биосфера»** — Разработка научных подходов и методов спутникового мониторинга наземных компонент биосферы, в том числе для исследования глобальных изменений, взаимодействия человека и природы.
- **«Мониторинг-Климат»** — Использование методов и данных ДЗЗ, для изучения климата процессов и опасных природных и антропогенных 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»** — Развитие научных основ и методов исследования атмосферы на основе технологий и систем спутникового мониторинга.
- **«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 2023 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 2023–2025 гг. Основными направлениями данных работ являлись:

- Развитие подходов к организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач, в том числе автоматизированной обработки спутниковых данных
- Создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования
- Поддержка (включая формирование и ведение сверхбольших архивов спутниковых данных и результатов их обработки) и развитие ЦКП ИКИ-Мониторинг для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений, в том числе решения междисциплинарных задач

Подробно полученные в данном направлении результаты изложены в следующих научных публикациях [1, 8, 9, 13, 15, 16, 19, 22–24, 26–28, 30, 35, 53, 54, 58, 61–63, 68, 69, 73–75, 77, 79, 81–84, 87, 91, 115, 117–122, 131–133].

### **1.1 Развитие подходов к организации распределённой обработки и анализа данных ДЗЗ для решения научных и прикладных задач, в том числе автоматизированной обработки спутниковых данных**

#### *1.1.1 Анализ возможностей адаптации технологий мониторинга пожаров по данным MODIS к данным VIIRS*

Применяемая в настоящее время в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» технология мониторинга пожаров использует как основной источник данных сведения об активном горении, получаемые по данным приборов среднего пространственного разрешения MODIS спутников Aqua и Terra. Данные позволяют проводить как оперативный мониторинг, так и работы по изучению и анализу накопленных с 2001 г. рядов данных о пожарах на всей территории Российской Федерации. Оперативно пополняемые ряды данных используются не только для получения информации об активном горении, но и для получения интегральных оценок параметров пожаров и их последствий, в том числе пройденных огнём площадей. Получаемые с использованием данных MODIS оценки показывают хорошую точность по сравнению с данными высокого пространственного разрешения благодаря применяемым в технологии мониторинга специальным коррекциям.

По информации НАСА аппараты Aqua и Terra подходят к концу своего эксплуатационного срока и их миссии завершатся ориентировочно в 2025–2026 гг. При этом остаются доступными данные запущенных в 2011 и 2017 гг. аппаратов NPP и NOAA-20 с прибором VIIRS на борту. Прибор VIIRS обеспечивает получение информации ДЗЗ в спектральных каналах, необходимых для выявления термических аномалий. Для этого прибора доступны открытые и бесплатные сервисы предоставления продуктов с информацией о пожарах и программные пакеты обработки, а так же, данные, получаемые в рамках соглашения о сотрудничестве с ФГБУ НИЦ «Планета», осуществляющего прием и обработку данных перечисленных аппаратов. Однако из за различного пространственного разрешения приборов (разрешение пиксела MODIS в надире — 1 км, пиксела VIIRS — 375 м) без адаптации технологии мониторинга возможно существенное изменение получаемых оценок характеристик пожаров,

приводящее к невозможности получения сопоставимых оперативных оценок и ретроспективных сравнений.

В 2023 г. были проведены работы по оценке изменений при переходе на данные более высокого разрешения прибора VIIRS и анализу возможностей адаптации существующей технологии мониторинга пожаров для получения сопоставимых оценок при исключении данных MODIS. На первом этапе, проведен расчет наборов данных о пожарах, основанных только на наблюдениях VIIRS. На основе сформированных данных получены сравнительные оценки пройденных пожарами площадей на территории с данными «полного» набора по данным VIIRS и MODIS. Результаты сравнения общих и лесных площадей пожаров по территории РФ за 2020 г. приведены на рисунке 1.1.1.1

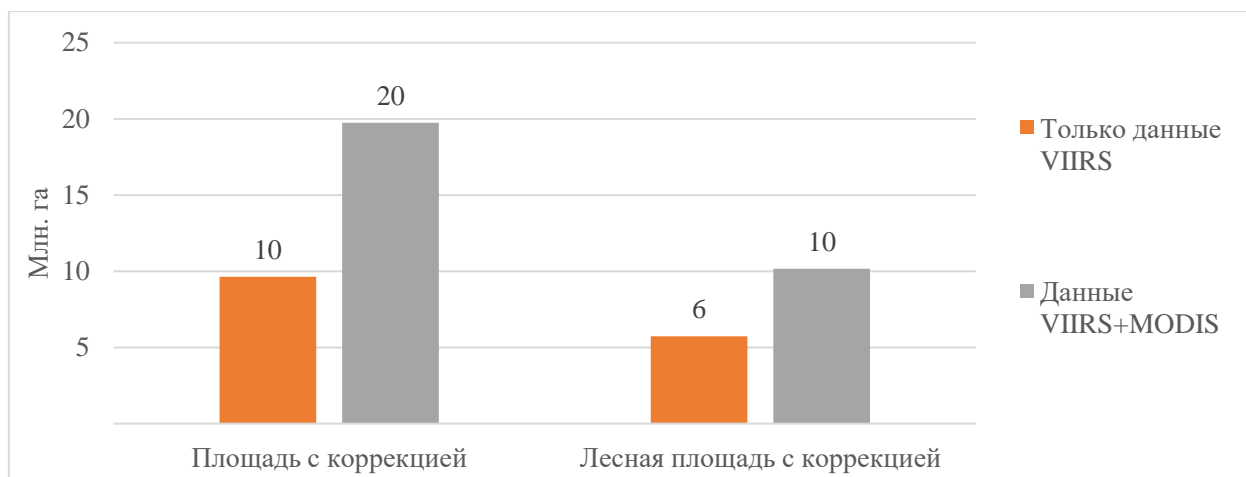


Рисунок 1.1.1.1 — Оценки пройденных пожарами площадей на территории РФ за 2020 г., млн га

Установлено, что исключение данных MODIS приведет к практически двукратному занижению оценок площадей пройденных огнем. Таким образом, мониторинг пожаров только по данным VIIRS без адаптации существующей технологии невозможен и необходимо проведение работ по анализу возможностей и адаптации технологий мониторинга пожаров к данным VIIRS для получения сопоставимых с накопленными ранее оценок.

Проведен анализ изменений, наблюдаемых при переходе на более высокое разрешение VIIRS и выявлены основные: изменение геометрически детектируемых площадей горения, изменившаяся связность отдельно наблюдаемых очагов горения в один пожар, появление «пропусков» площадей горения. Базовой причиной таких изменений, в первую очередь, является размер пикселя. На основе этого заключения был проведен ряд моделирований и установлено, что увеличением размера исходного пикселя продукта термических аномалий VIIRS можно скомпенсировать наблюдаемые факторы изменений, вызванных более высоким разрешением прибора, а так же возможно использовать существующую технологию мониторинга и получить сопоставимые «полным» набором данных оценки. Для определения размера пикселя, дающего наиболее близкую оценку к характеристикам «полного» набора были сформированы модельные ряды данных пожаров с различными размерами пикселя (1; 1,5; 2; 2,5 км). Результаты сравнения оценок приведены на рисунке 1.1.1.2.

На основе анализа результатов сопоставлений получены предварительные коэффициенты масштабирования для пикселей VIIRS, при которых сравниваемые площади единичных пожаров, а также оценки общих и лесных пройденных пожарами площадей близки по значениям к данным набора, включающего MODIS. Такой размер может составлять 1,1–1,3 км. На рисунке 1.1.1.3 приведены оценки общих и лесных площадей, пройденных пожарами на территории РФ за 2020 г., полученные на основе «полного» набора данных о пожарах и модельного, сформированного с пропорционально

увеличенным пикселем VIIRS. Сравнение показало достаточную близость получаемых оценок.

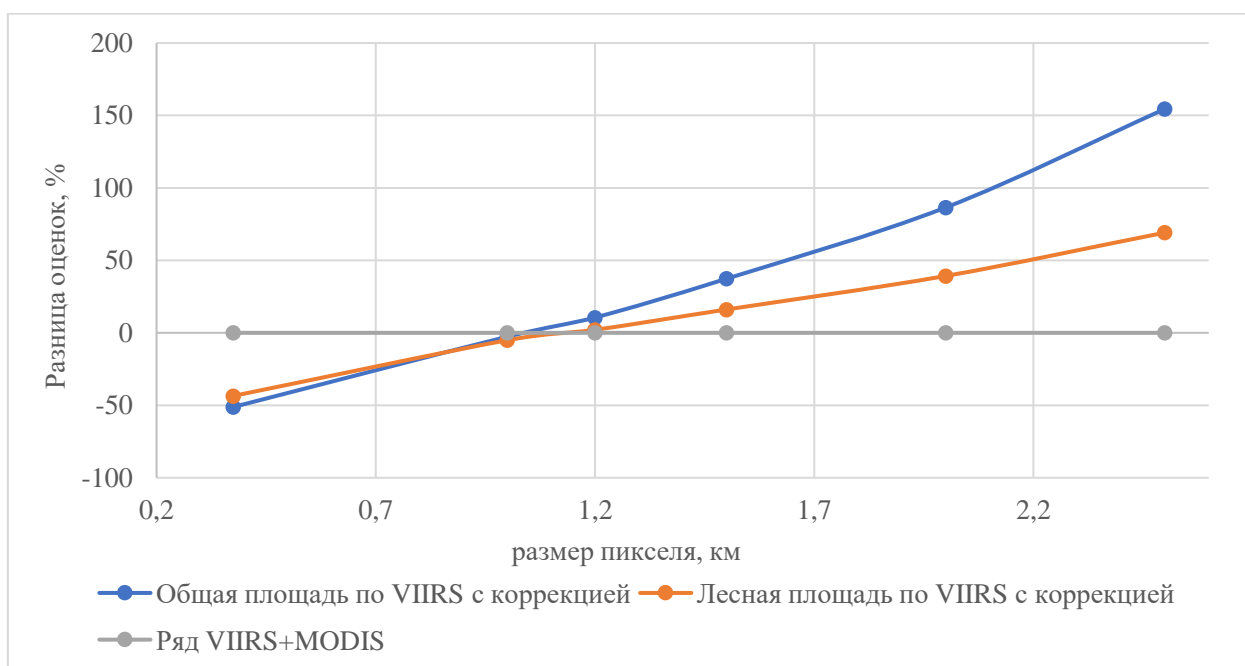


Рисунок 1.1.1.2 — Разница в оценках пройденных пожарами площадей на территории РФ за 2021 г. с модельными рядами, %

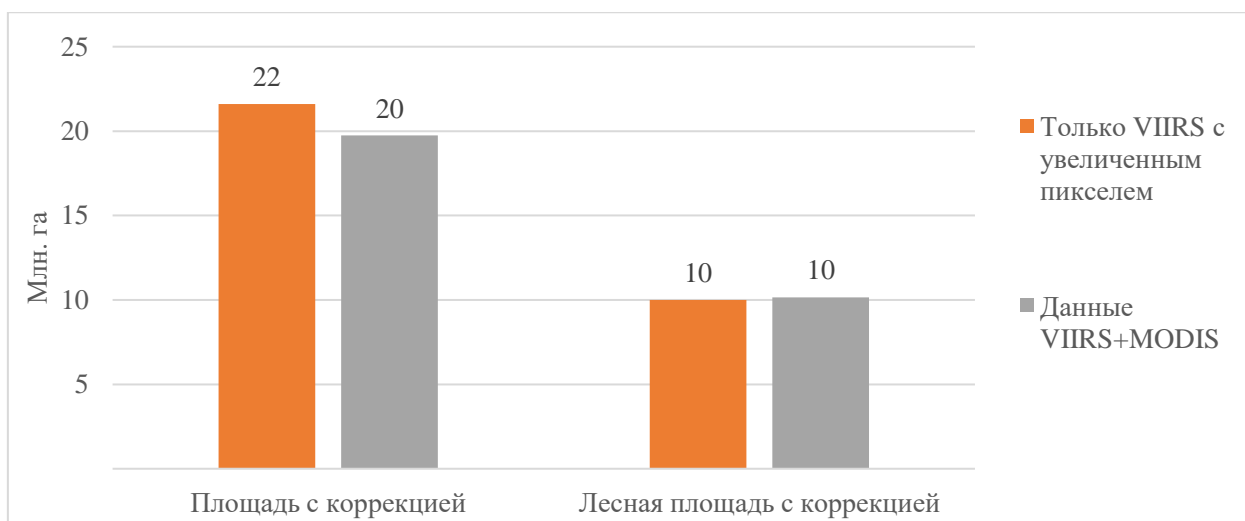


Рисунок 1.1.1.3 — Оценки пройденных пожарами площадей на территории РФ за 2020 г. по данным «полного» набора и сформированного только данными VIIRS с увеличенным размером пикселя

Кроме этого, при анализе причин изменений оценок площадей при переходе на более высокое разрешение VIIRS, в первую очередь, лесных пожаров было выявлено, что кроме размера пикселя такой причиной может быть частота наблюдения горения космическими аппаратами. Был проведен анализ частоты наблюдений пожаров различными аппаратами, сформированы 17 модельных рядов данных для крупных лесных пожаров по данным MODIS с различной частотой наблюдений (полной и искусственно уменьшенной) и разными размерами пикселя. Установлено, что управляя размером пикселя и частотой наблюдения можно получить наиболее полное покрытие пройденной огнем площади. Такой подход возможно использовать, в том числе, при проведении моделирования оптимальных параметров орбит и разрешения приборов группировки КА для оценки пожаров на различных типах территорий.

Таким образом, при завершении эксплуатационного срока спутников Aqua и Terra для продолжения работы системы дистанционного мониторинга пожаров ЦКП «ИКИ-Мониторинг» возможно использование существующей технологии мониторинга. Для обеспечения преемственности формируемых рядов данных и получения сопоставимых оценок возможно применение соответствующей корректировки размеров пикселей данных VIIRS.

### ***1.1.2 Система совместного анализа временных рядов наблюдений вулканической активности по данным низкоорбитальных и геостационарных спутников***

В рамках информационной системы VolSatView была разработана технология накопления временных рядов данных дистанционного измерения радиояркостной температуры на основе спутниковых наблюдений в зонах вулканической активности, а также пользовательский интерфейс интерактивного анализа рядов наблюдений.

В рамках ЦКП «ИКИ-Мониторинг» производится регулярная обработка данных низкоорбитальных спутников, позволяющая выявлять участки температурных аномалий по оперативным данным, а также формировать историческую базу данных аномалий. Для решения настоящей задачи был проведен ретроспективный анализ базы данных температурных аномалий по данным прибора VIIRS. Результатом такого рода обработки стало растровое изображение, пиксели которого характеризуют число эпизодов возникновения температурных аномалий. С помощью адаптивного подбора пороговых значений в регионе Камчатки и Северных Курил были определены участки наиболее интенсивной вулканической активности. Отбор участков такого рода, соответствующим расположению вулканов региона, позволил запустить формирование долгосрочных временных рядов наблюдений радиояркостной температуры для изучения активности действующих вулканов.

Помимо данных приборов ДЗЗ, расположенных на низкоорбитальных спутниках, (VIIRS, MODIS) была поставлена задача формирования временных рядов, полученных прибором АНП с геостационарных спутников Himawari-8 и -9 в связи с тем, что частота его наблюдений составляет 10 минут. Однако различие углов съемки с низкоорбитальных и геостационарных спутников проявляется в несоответствии видимого расположения участков термальных аномалий на изображениях в силу характерного рельефа вулканов. Для решения этой проблемы предложена коррекция координат участков наблюдения для достижения сопоставимости данных низкоорбитальных и геостационарных спутников.

В основе алгоритма коррекции координат лежит использование формул геометрической оценки видимых координат объекта при заданном положении спутника согласно спецификации Low Rate Image Transmission (LRIT)/High Rate Image Transmission (HRIT) Global Specification (CGMS, 2013).

Таблица 1.1.2.1 — Коррекция координат вулканов

Название	Высота объекта, км	Сдвиг, км	Высота спутника над горизонтом, град	Азимут, град	Сдвиг на восток, км (град)	Сдвиг на север, км (град)
Шивелуч	2,8	6,58	23,0	204,2	2,7 (0,044)	6,0 (0,054)
Ключевской	2,8	6,36	23,7	203,5	2,54 (0,040)	5,83 (0,022)
Ключевской	4,7	10,67	23,7	203,5	4,25 (0,068)	9,81 (0,088)
Безымянный	2,8	6,36	23,8	203,5	2,54 (0,040)	5,83 (0,022)
Карымский	1,5	3,0	26,0	202,6	1,15 (0,016)	2,31 (0,010)
Алайд	2,3	3,98	30,1	198,8	1,28 (0,018)	3,38 (0,012)
Эбеко	1,2	2,06	30,2	199,4	0,79 (0,011)	1,94 (0,017)



Временные ряды данных формировались по наблюдениям с низкоорбитальных спутников и с геостационарных спутников как на участках, выбранных с коррекцией координат, так и на участках без коррекции координат. Примеры анализа временных рядов показывают лучшую корреляцию данных, полученных на скорректированных участках, по сравнению с нескорректированными.

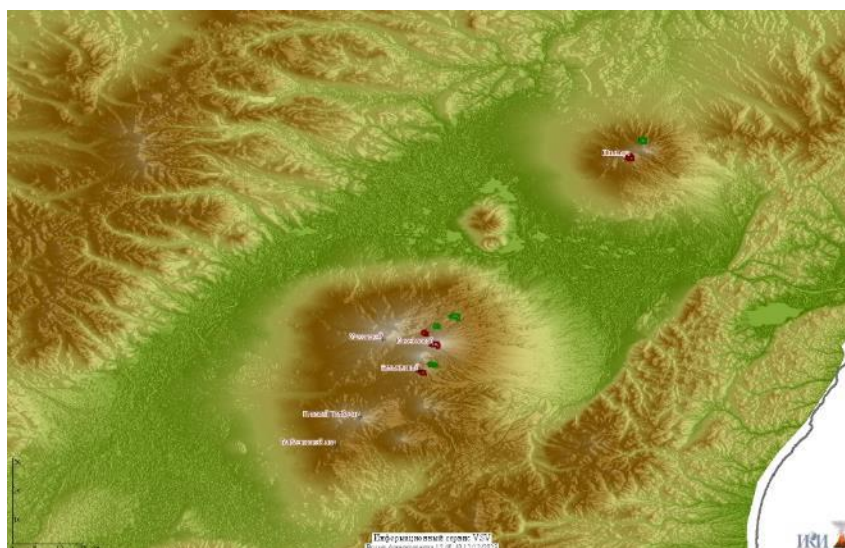


Рисунок 1.1.2.1 — Рельеф полуострова Камчатка по данным SRTM. Контуры участков наблюдения по данным геостационарных спутников без коррекции координат (красные) и с коррекцией (зеленые)

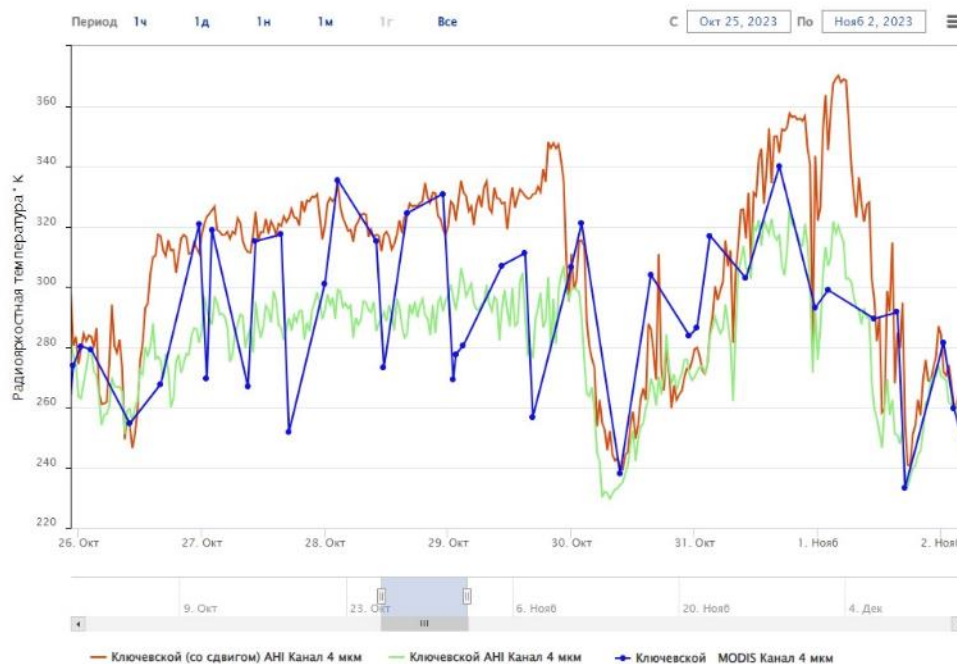


Рисунок 1.1.2.2 — Динамика радиояркостной температуры при извержении вулкана Ключевской в октябре-ноябре 2023 г. по данным MODIS и АНИ

Система обработки данных на участках наблюдения формирует выборку пикселей в окрестностях вулканов. Статистический анализ выборки позволяет фильтровать данные и анализировать производные величины, такие как максимум, минимум, среднее по окрестности или стандартное отклонение. В пользовательском интерфейсе реализованы возможности работы со всеми доступными для анализа величинами.



Рисунок 1.1.2.3 — Динамика радиояркосной температуры по данным АНІ на вулкане Ключевской с отображением среднего, стандартного отклонения и минимума/максимума в пределах участка наблюдения

### ***1.1.3 Создание системы для распределенной работы с данными альтиметрии в интересах мониторинга внутренних водоёмов***

Уровень воды — важный параметр, позволяющий оценивать запасы воды в водоёмах, что особенно критично в регионах, подверженных засухам и наводнениям. Для его контроля применяются различные системы мониторинга уровня воды, которые позволяют регулярно получать и аккумулировать результаты измерений уровня воды для анализа динамики запасов пресной воды, а также оценивать риски и последствия различных сезонных и чрезвычайных явлений.

Основными источниками данных для таких систем мониторинга являются наземные и дистанционные измерения, причём наземные в последнее время всё больше и больше уступают дистанционным по доступности. Дистанционные методы позволяют получать информацию об уровне воды даже посредством измерений в видимом и ИК-диапазонах), но классическим способом остаётся радарная альтиметрия.

Для работы с такими данными, в первую очередь с данными прибора SRAL KA Sentinel-3, в составе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» была реализована система сбора, обработки и агрегации данных для мониторинга внутренних водоёмов. В рамках этой системы для наблюдаемых водоёмов автоматизированно создаются сети космических гидропостов (КГП) и для каждого гидропоста рассчитывается временной ряд измерений на всю глубину архива. Следующим шагом в развитии этой системы стало создание и внедрение инструментария работы с данными альтиметрии в составе картографического интерфейса системы «Вега-Science».

Интерфейс позволяет визуализировать созданные сети КГП (рисунок 1.1.3.1), для каждого КГП строить графики хода временных рядов измерений (рисунок 1.1.3.2) и, что особенно важно, проводить совместный анализ накопленных измерений с другими данными, как картографическими, так и спутниковыми (рисунки 1.1.3.3–1.1.3.5), а также применять различные инструменты системы «Вега-Science» для анализа выбранных данных (рисунок 1.1.3.5).

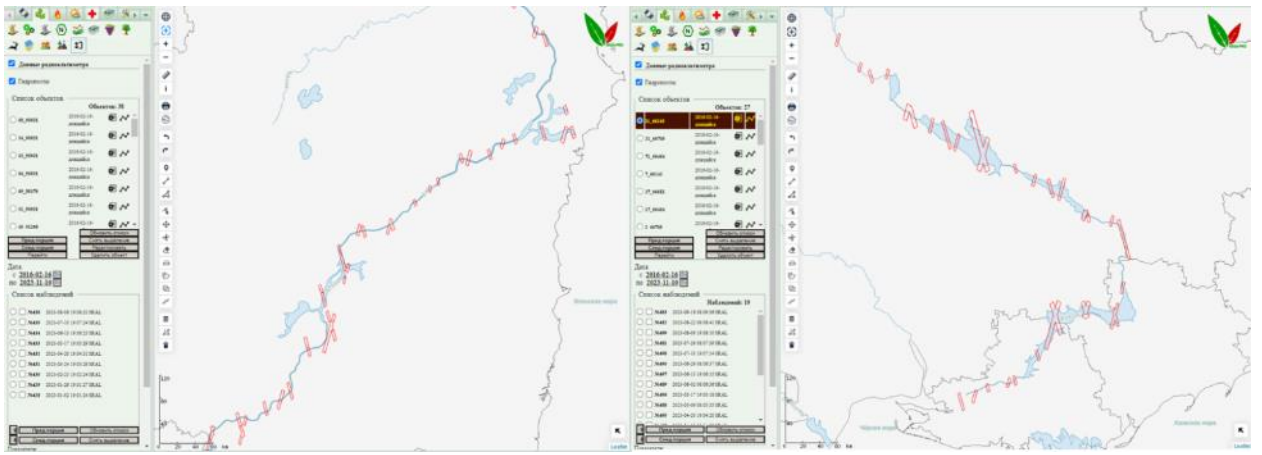


Рисунок 1.1.3.1 — Сети КГП для реки Амур (слева) и реки Днепр (справа)

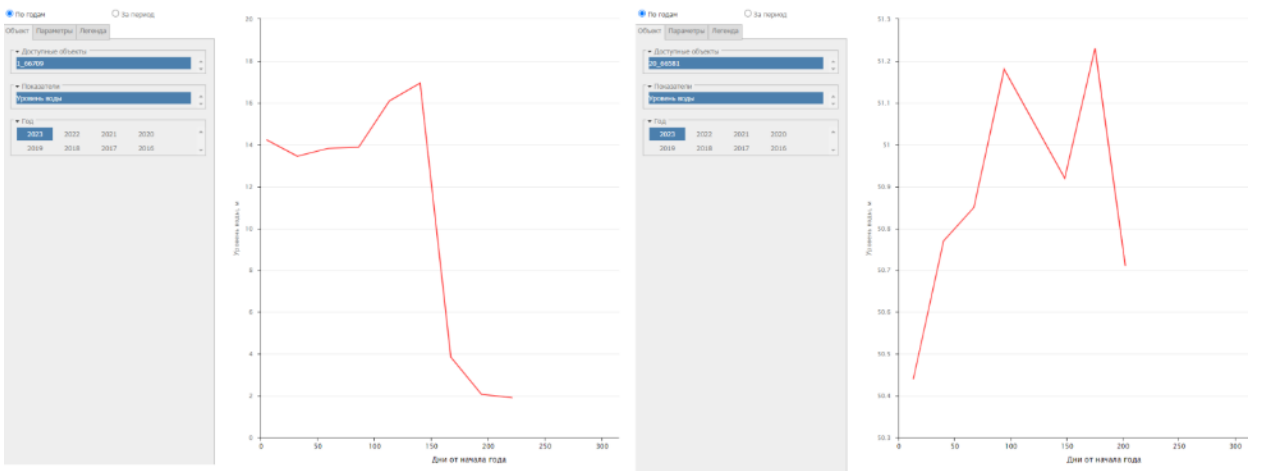


Рисунок 1.1.3.2 — Временные ряды наблюдений уровня воды на КГП №1\_66709 (слева) и №20\_66581 (справа)

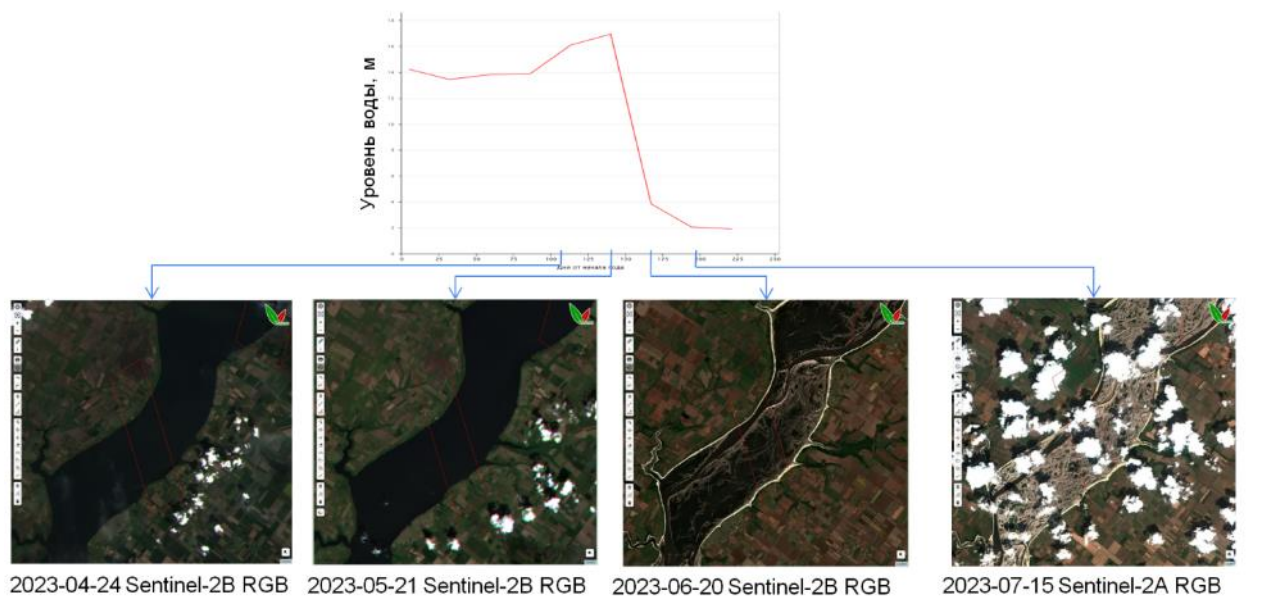


Рисунок 1.1.3.3 — Изменение уровня воды по данным альтиметрии на КГП № 1\_66709 реки Днепр, сопоставленное с оптическими спутниковыми снимками за даты проведения наблюдений с помощью альтиметрии



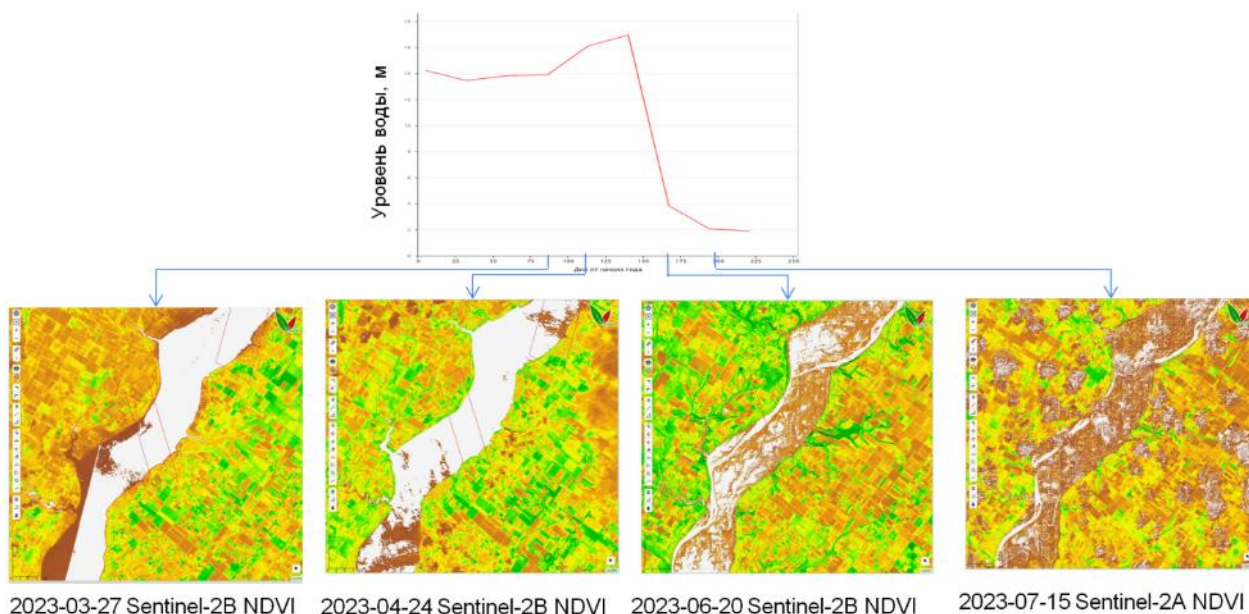


Рисунок 1.1.3.4 — Изменение уровня воды по данным альтиметрии на КПП № 1\_66709 реки Днепр, сопоставленное с оптическими спутниковыми снимками (перерасчет в NDVI) за даты проведения наблюдений с помощью альтиметрии

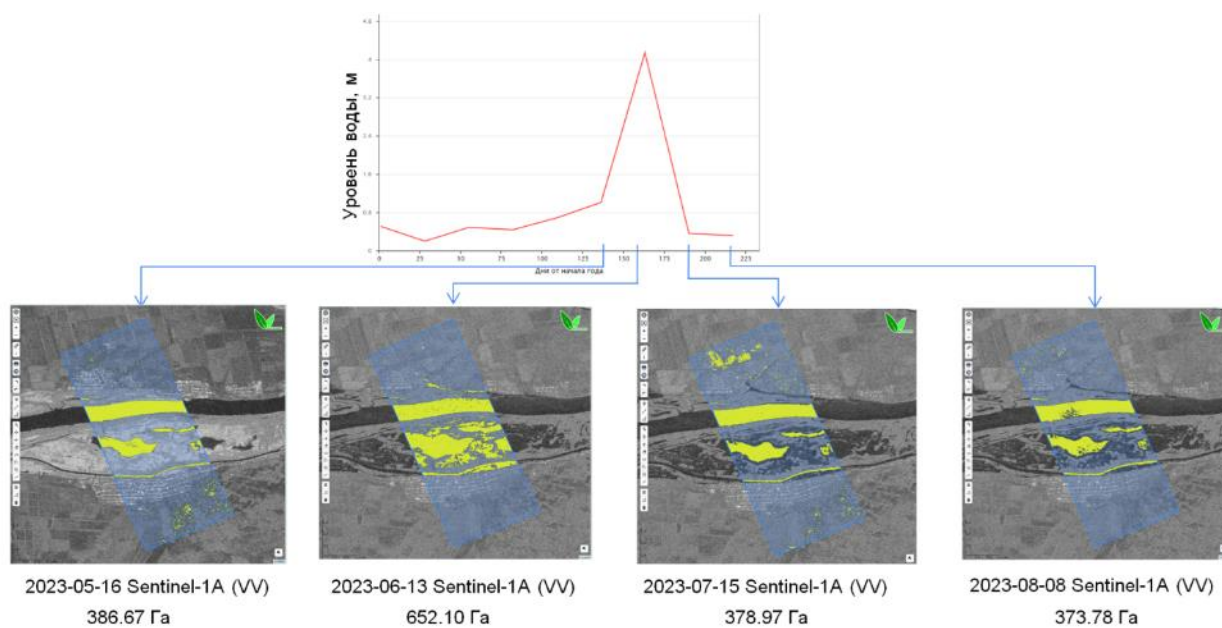


Рисунок 1.1.3.5 — Изменение уровня воды по данным альтиметрии на КПП № 4\_66851 реки Днепр, сопоставленное с радиолокационными спутниковыми данными за даты проведения наблюдений, с выделенной площадью поверхности водоёма в границах КПП №4\_66851

Возможности совместного анализа данных альтиметрии с другими источниками информации широки. На рисунках 1.1.3.3–1.1.3.4 приведен пример анализа изменений уровня воды на КПП, расположенном выше по течению реки Днепр от Каховской ГЭС, совместно с данными спутниковых снимков за период наблюдения с января по август 2023 г.

На рисунке 1.1.3.5 приведен пример анализа изменения уровня воды на КПП, расположенном ниже по течению реки Днепр от Каховской ГЭС, совместно с данными спутниковых снимков за аналогичный период. Также на данном рисунке продемонстрированы возможности подготовленного инструментария, а именно классификации спутниковых данных с автоматическим вычислением площади интересующего класса. На рисунке желтый цвет соответствует классу, определенному как



водная поверхность. Под фрагментами изображений приведена площадь водного зеркала реки Днепр в границах КГП № 4\_66851 за даты наблюдений.

#### ***1.1.4 Широкомасштабная оценки привязки продуктов VIIRS (SNPP) на основе спутниковых данных MSI (Sentinel-2)***

В настоящей работе исследовалась точность привязки стандартных продуктов, получаемых по данным прибора VIIRS, установленного на аппарате Suomi NPP, для неоднородной территории континентального охвата за полный сезон 2020 г. Оценивалась привязка как непосредственно продуктов VNP09GA, распространяемых в синусоидальной проекции с пространственным разрешением 500 м, так и производных продуктов, полученных после восстановления серий измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) высокого временного разрешения на базе мультиспектральных данных VNP09GA. В настоящем исследовании оценивались данные VIIRS в красном и ближнем ИК каналах с пространственным разрешением 500 м, а в качестве эталонных данных с высоким разрешением использовались данные приборов MSI (аппараты Sentinel-2A/B) в соответствующих спектральных каналах с разрешением 10 м. Данные VIIRS и MSI покрывали территорию России квазирегулярной сеткой, в основе которой лежит тайловая структура продуктов MSI (Sentinel-2). Исходные продукты VNP09GA были получены из центров распространения данных LP DAAC (<https://lpdaac.usgs.gov>). Восстановленные мультиспектральные безоблачные эталонные изображения VIIRS создаются в потоковом режиме для территории России с ежедневной временной детализацией путем применения универсального алгоритма весовой скользящей интерполяции LOWESS к сезонной временной серии сеансных изображений продукта VNP09GA с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» и доступны пользователям систем семейства Вега (<http://sozvezdie-vega.ru/>) в качестве стандартных продуктов. На этапе подготовки восстановленные изображения ежедневных измерений КСЯ проецировались из исходной синусоидальной проекции в широтно-долготную проекцию с ожидаемой максимальной ошибкой проецирования не более 12 м с учетом выбранного метода геометрического преобразования.

Для оценки привязки использовался описанный в предыдущих отчётах метод, который позволяет в автоматическом режиме оценивать точность привязки спутниковых изображений, используя, в том числе, данные более низкого пространственного разрешения. Преимущества разработанного метода заключаются в следующем: 1) физические значения и единицы измерений источника и эталона могут отличаться, что необходимо учитывать при сравнении данных различных спутниковых систем и разных уровней их обработки; 2) используемое при оценке привязки эталонное изображение должно обладать высокой точностью привязки, однако может иметь более низкое пространственное разрешение; 3) метод не накладывает дополнительные требования к тематическому сопровождению оцениваемого изображения, которое может не иметь масок облачности и теней, поскольку зашумленные участки автоматически исключаются из анализа на основе значений корреляции с эталоном. В этом эксперименте оценка точности привязки осуществлялась на основе множества распределенных по территории России участков размером 6 на 6 км (рисунок 1.1.4.1).

В процессе оценки происходил перебор и закругление путём осреднения групп пикселей блоков изображения MSI размером 50×50 пикселей для формирования сопоставляемого с эталоном VIIRS изображения MSI низкого пространственного разрешения. При этом положение сдвигаемого с шагом 10 м изображения MSI фиксировалось с вычислением метрики корреляции Пирсона и вектора сдвига. Соответствующий максимуму корреляции сдвиг характеризует отклонение положения (ошибку привязки) фрагмента изображения VIIRS от исходного положения изображения MSI, что позволяет в конечном итоге оценить локальную недопривязанность данных. В результате исследования было установлено, что исходные продукты VNP09GA в

красном и ближнем ИК каналах имеют среднее значение модуля ошибки привязки 166,6 и 167,4 м (дисперсия оценок — 210,6 и 208,5 м) соответственно с использованием информации по 1739 и 1623 участкам размером 6×6 км. При этом средние значения модуля ошибки привязки для интерполированных ежедневных изображений VIIRS в красном и ближнем ИК каналах составили 88,6 и 85,0 м (дисперсия оценок — 104,5 и 100,0 м) и получены по 4946 и 5155 участкам. Таким образом, значимых различий ошибки привязки между каналами VIIRS не обнаружено, а субдекаметровые различия укладываются в погрешность привязки самого эталона. Заметная разница в количестве использованных участков возникает из-за наличия мешающих факторов в исходных данных VNP09GA, которые приводили к исключению участков из анализа, в то время как интерполированные изображения были свободны от влияния мешающих факторов. Несмотря на то, что средние значения ошибки привязки не превышают размера пикселя VNP09GA, наблюдаемые максимальные значения отклонений составили более 700 м для продукта VNP09GA и около 300 м для интерполированных изображений (рисунок 1.1.4.2).

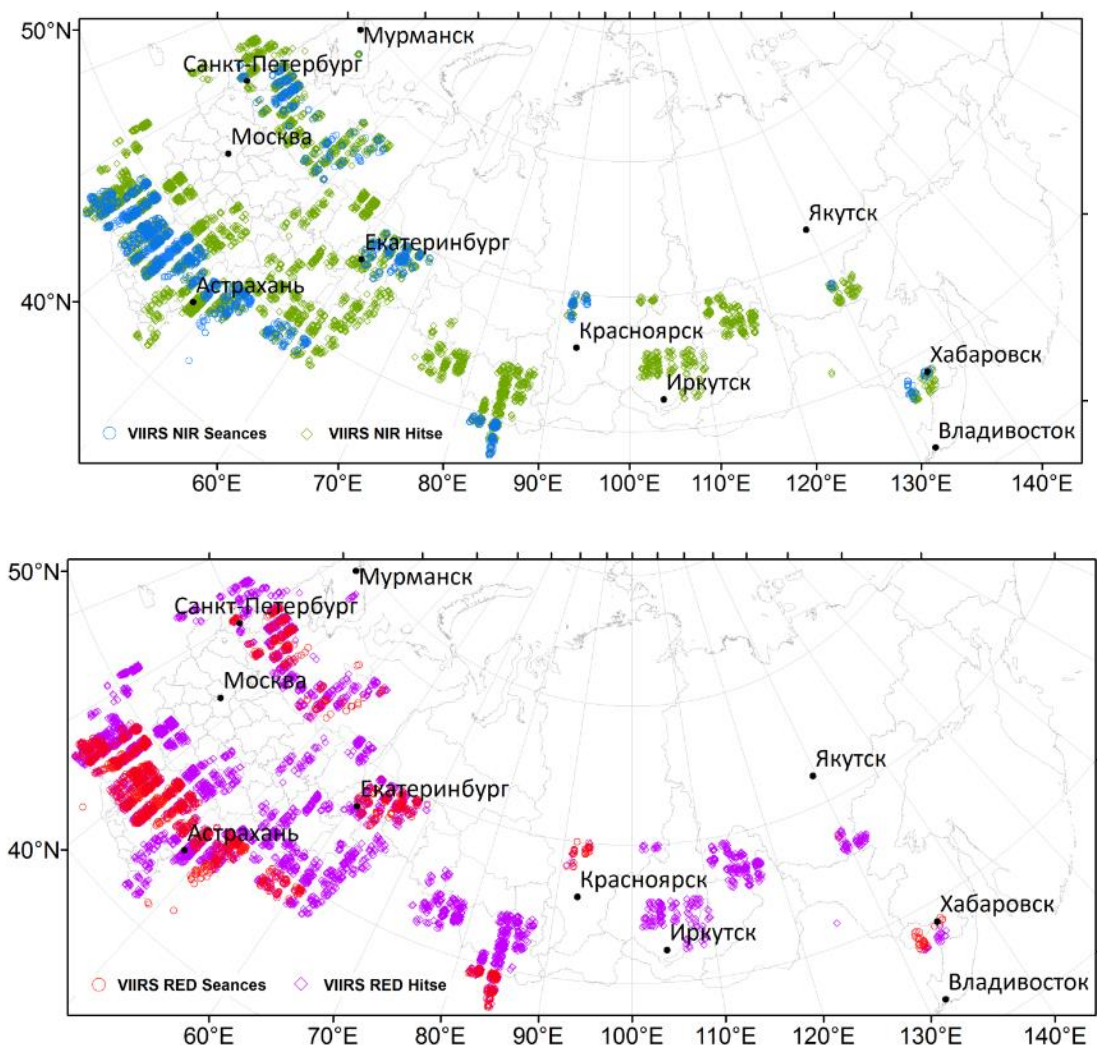


Рисунок 1.1.4.1 — Расположение на территории России тестовых участков для оценки точности привязки продуктов VNP09GA (Seances) и ежедневных восстановленных изображений (Hitse) в ближнем ИК (вверху) и красном (внизу) каналах прибора VIIRS

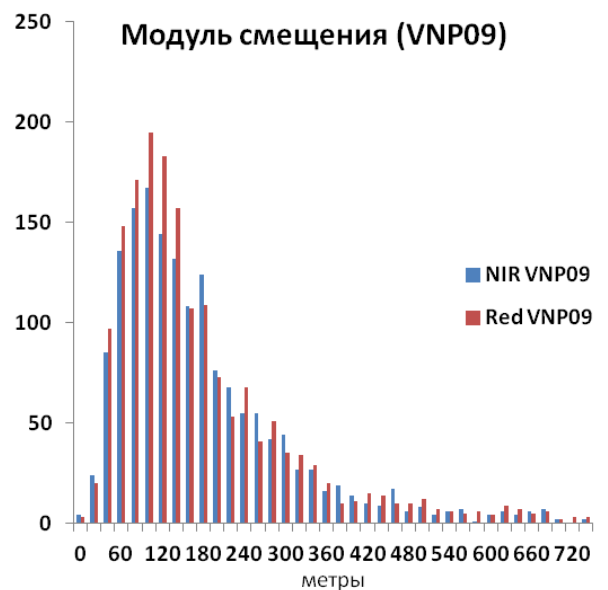
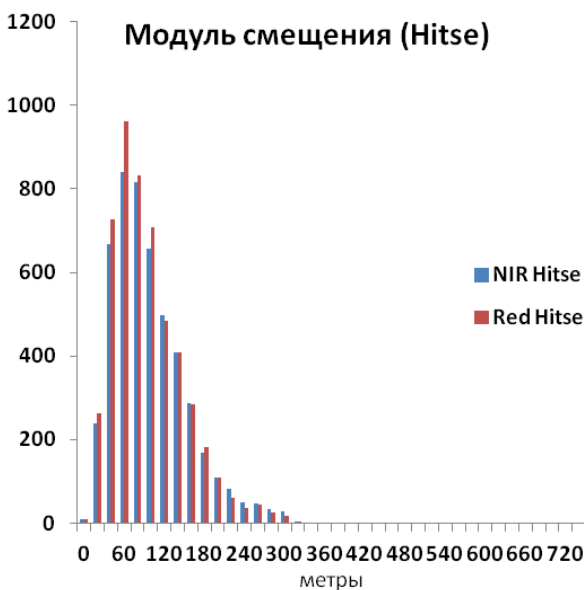
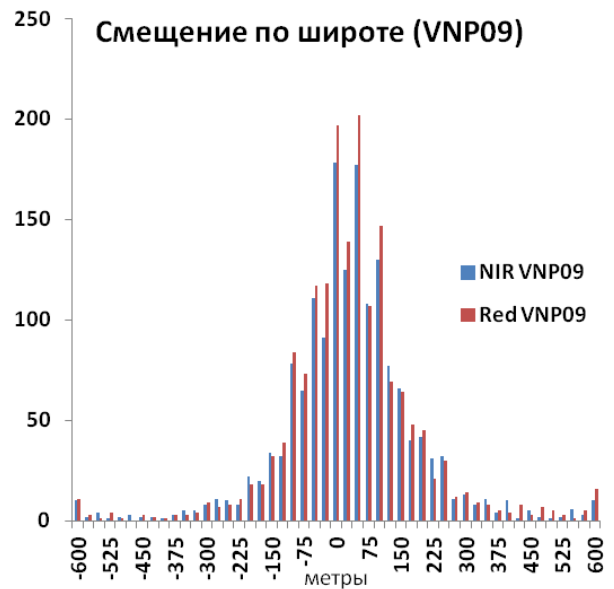
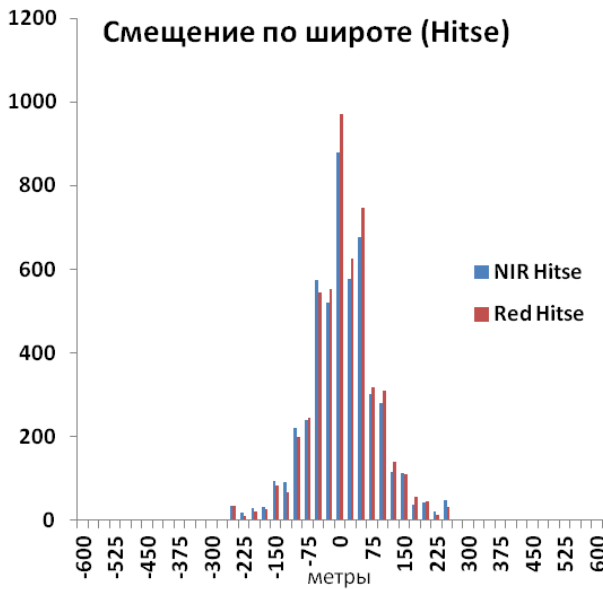
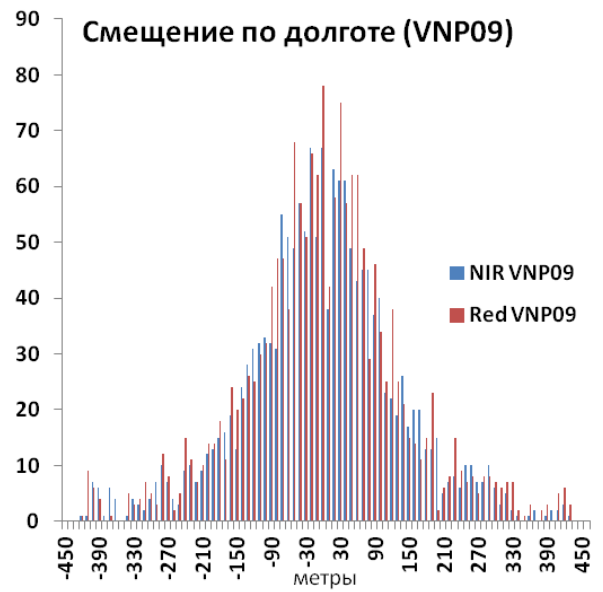
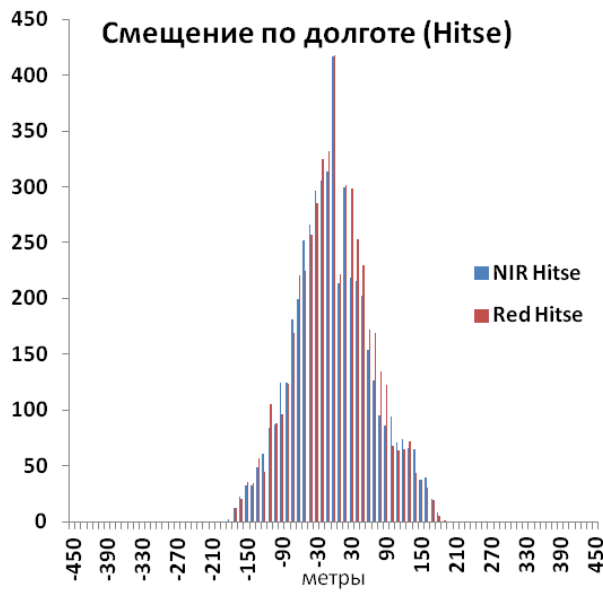


Рисунок 1.1.4.2 — Результаты сравнения ошибок привязки исходных сеансов (VNP09GA) и интерполированных ежедневных изображений (Hitse) в красном и ближнем ИК каналах VIIRS: по долготе (вверху), широте (в центре) и по модулю (внизу), м

Таким образом, подтвержден сделанный в предыдущих работах вывод о том, что весовая интерполяция временной серии сеансных изображений существенно (в данном случае, почти вдвое) уменьшает ошибки привязки.

### ***1.1.5 Развитие методов радарно-оптического синтезирования спутниковых данных для восстановления серий безоблачных дистанционных характеристик растительного покрова высокого пространственного и временного разрешения с использованием методов машинного обучения***

В рамках работ за отчетный период был изучен потенциал радарных данных С-диапазона Sentinel-1 для восстановления временных рядов безоблачных значений вегетационного индекса NDVI с пространственным разрешением 20 м на территорию Калининградской области за 2021 год спутниковых наблюдений с использованием данных спутниковой системы Sentinel-2. Ранее была продемонстрирована возможность восстановления измерений оптического диапазона длин волн по радиолокационным данным путём объединения технологий дистанционного зондирования и методов машинного обучения. Одним из наиболее эффективных для решения этих задач является метод случайного леса, являясь одновременно производительным и устойчивым.

Калининградская область расположена в бассейне реки Преголя и окружена Балтийским морем и Балтийским заливом с запада и юго-запада. В рельефе преобладают низкие равнины, болота и пологие холмы, на 20 % территории растут смешанные леса. Под влиянием океана климат влажный с годовым количеством осадков 600-700 мм, среднегодовой уровень облачности превышает 65 %. Регион является преимущественно аграрным, поэтому задача построения временных серий безоблачных наблюдений является актуальной.

Для оценки результатов восстановления было выбрано три тестовых региона А1, А2 и А3 на севере и западе Калининграда (рисунок 1.1.5.1), в которых были реконструированы временные ряды NDVI для трёх различных типов растительного покрова — пахотные земли, луга и лесная растительность.

В качестве признаков были использованы цифровая карта высот SRTM с пространственным разрешением 30 м., а также карта растительного покрова ESRI за 2021 год, построенная на основе спутниковых данных Sentinel-2.

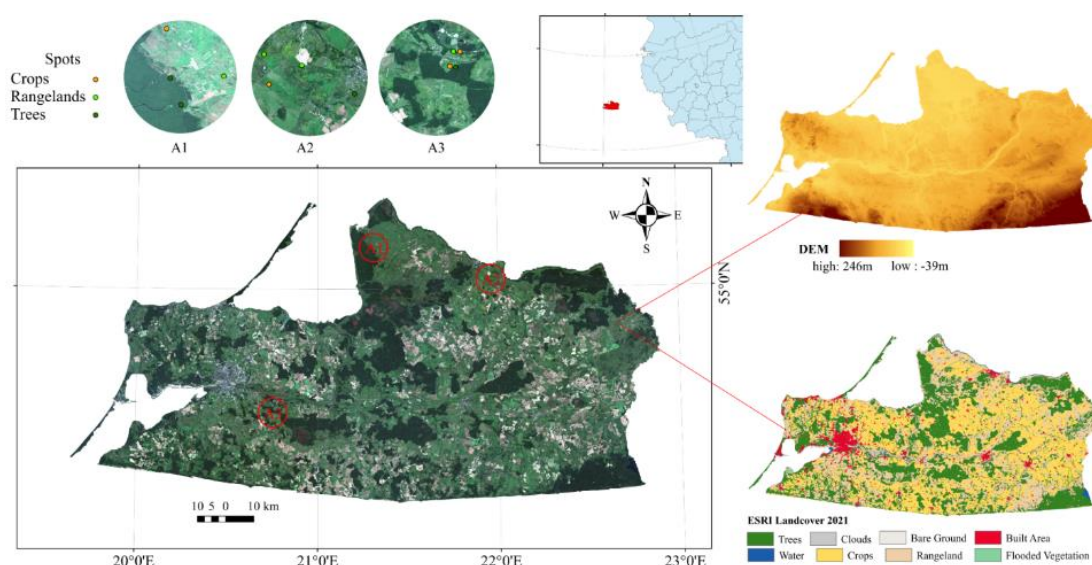


Рисунок 1.1.5.1 — Расположение региона исследования и тестовых участков А1-А3 для восстановления временных серий NDVI, карта рельефа SRTM (с разрешением 30 м) и карта растительного покрова (с разрешением 10 м) Калининградской области



В исследовании использовались 22 изображения Sentinel-1 уровня GRD и 75 изображений Sentinel-2 уровня L2A: всего 97 космических снимков Калининградской области, охватывающих временной диапазон с мая по октябрь 2021 г.

Чтобы устранить влияние спекл-шума и рельефа на радарные измерения S1 была проведена фильтрация, коррекция, и калибровка спутниковых данных с получением коэффициентов обратного рассеяния для поляризаций VV и VH. Предварительная обработка данных S2 заключалась в маскировании облачности и теней с использованием стандартных масок мешающих факторов для продукта L2A и расчете NDVI. Поскольку исходное пространственное разрешение данных S1 и S2 неодинаково, а геометрия пикселей S1 отличалась от геометрии S2, был выполнен ресемплинг исходных изображений в единую проекцию с пространственным разрешением 20 м.

При построении признакового пространства были выбраны 13 признаков, а именно: поляризации и комбинации VV, VH, VV/VH, VV+VH, индексы RVI, VDDPI, NDPI, DPSVIm, карты DEM и LULC, долгота, широта и дата.

Для минимизации влияния фенологии и погодных условий на точность модели в целях обеспечения минимальной разницы во времени между моментами съёмки S1 и S2, были выбраны 8 пар изображений, даты получения которых отличались не более чем на 1 день. Пространственный шаг выборки был задан 500 м, что позволило описать изменчивость территории исследования при разумном объеме обучающих данных (рисунок 1.1.5.2, слева). Всего было собрано 243 405 точек выборки в восьми парах изображений S1-S2.

Выборка была поделена на две части — 70 % в качестве обучающего набора и 30 % в качестве тестового набора. В целях снижения размерности пространства признаков был использован метод рекурсивного исключения признаков RFE (Recursive Feature Elimination), а также кросс-валидация, чтобы найти наилучшую комбинацию признаков, и в то же время использовали метод поиска по сетке и метод перекрестной проверки, чтобы найти наилучшую комбинацию параметров модели. Затем было проведено обучение на обучающем наборе по наилучшему сочетанию полученных признаков и параметров с получением оценочной модели для оценки тестового набора. На последнем этапе полный набор выборок был использован для обучения окончательной модели, которая была использована для реконструкции временных серий NDVI всей области исследования.

С помощью RFE было установлено наилучшее сочетание признаков ('VH', 'VH+VV', 'VH/VV', 'NDPI', 'DEM', 'time', 'LULC', 'lon', 'lat'), а настройка параметров дала оптимальные значения параметров (`n_estimators = 1000`, `max_depth = None`, `min_samples_leaf = 4`, `min_samples_split = 10`).

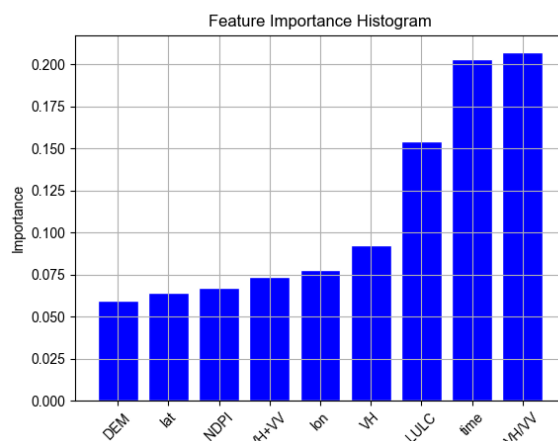
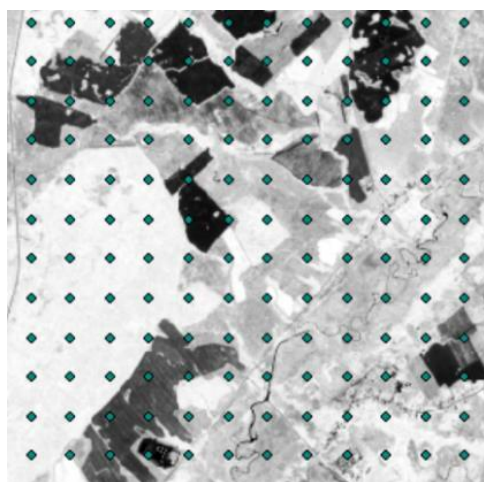


Рисунок 1.1.5.2 — Схема регулярного сэмпинга с шагом 500 м с изображением NDVI Sentinel-2 на заднем фоне (слева) и распределение информативности прошедших фильтрацию признаков (справа)



Диаграмма рассеяния в виде тепловой карты для исходных значений NDVI по тестовому набору и модельной оценкой NDVI приведена на рисунке 1.1.5.3 вместе с основными характеристиками полученной модели, включая среднеквадратическое отклонение (0,16), коэффициент корреляции (0,78), среднюю абсолютную ошибку (0,08) и индекс Уиллмота (0,87).

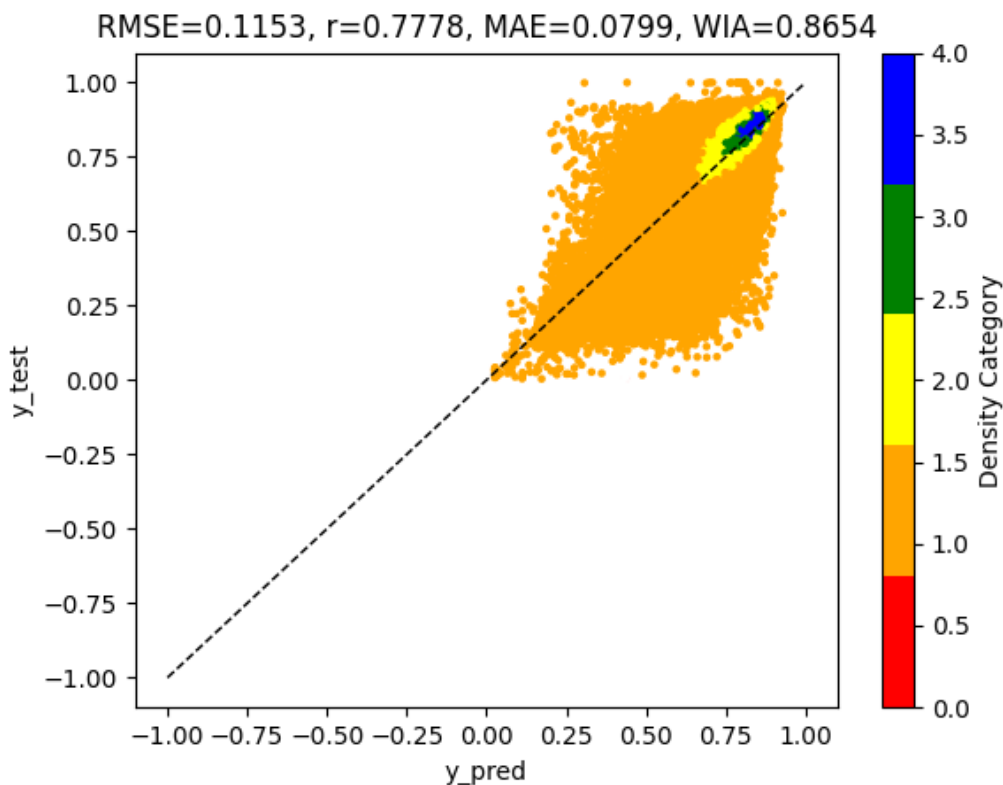


Рисунок 1.1.5.3 — Результаты оценки полученной модели по тестовому набору в сравнении с модельными значениями NDVI

С помощью окончательной модели были реконструированы изображения NDVI для всех изображений S1 (рисунок 1.1.5.4).

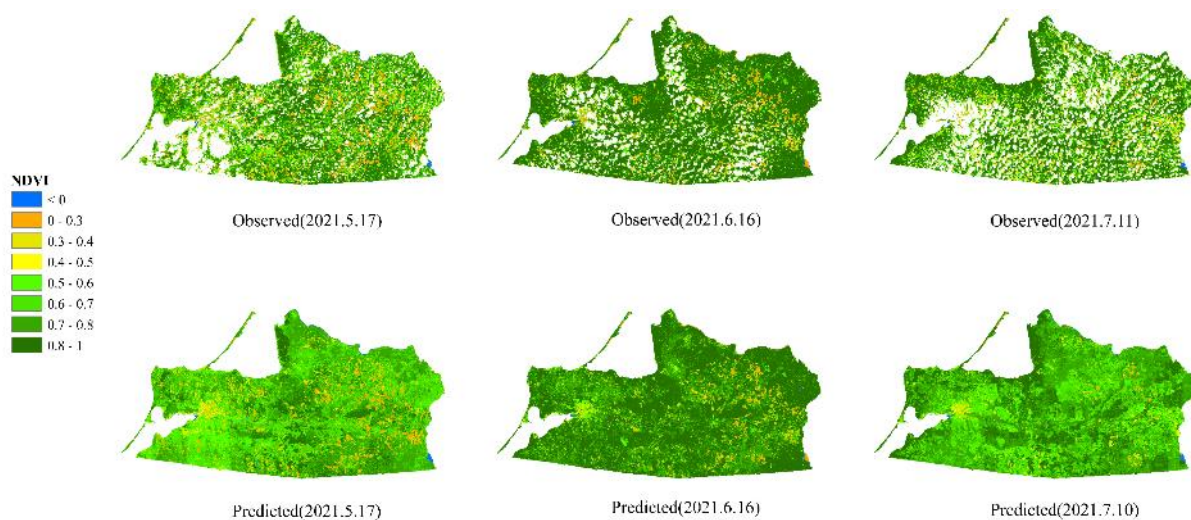


Рисунок 1.1.5.4 — Пример результатов восстановления изображений NDVI на всю территорию Калининградской области: снизу — реконструированные изображения NDVI по данным S1, сверху — реальные изображения NDVI по данным S2

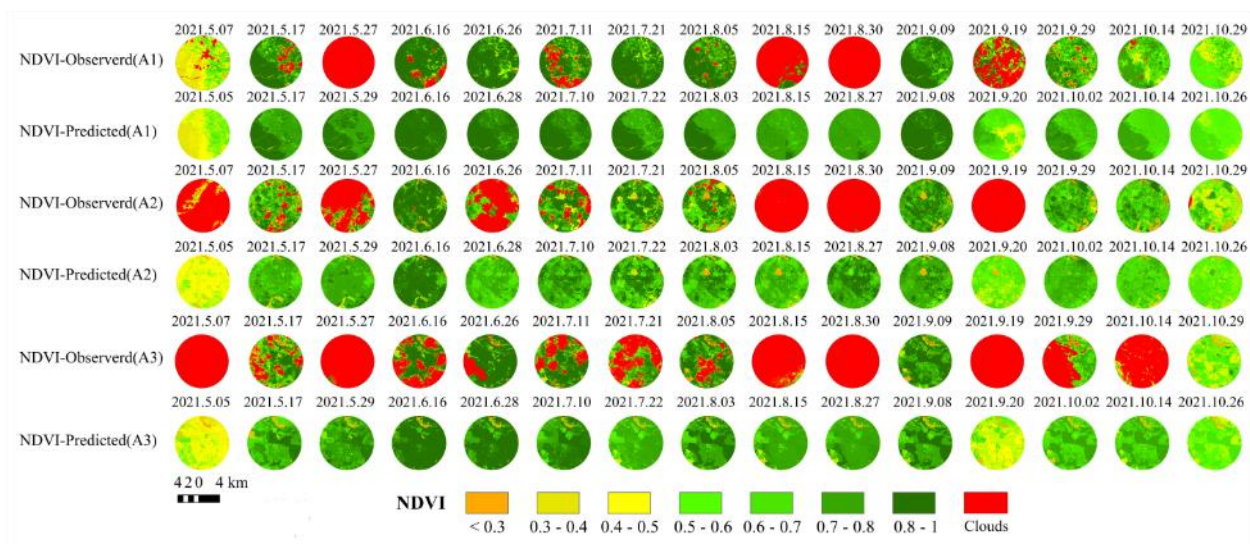


Рисунок 1.1.5.5 — Сравнение серий 15 пар S1-S2 исходных и восстановленных изображений NDVI для тестовых зон A1,A2,A3 с отличием дат съёмки не более четырёх дней

Выше (рисунок 1.1.5.5) приведена серии исходных и восстановленных изображений NDVI для трёх вышеупомянутых тестовых зон (A1, A2, A3) для 15 пар S1-S2 с отличием дат съёмки не более четырёх дней.

Внутри тестовых зон были выбраны несколько отдельных точек, соответствующих трём различным типам растительного покрова, для которых была восстановлена динамика значений NDVI по данным S1 в сравнении со значениями NDVI по данным S2 (см. рисунок 1.1.5.5).

Таким образом, в результате проведённых работ была создана регрессионная модель и разработан алгоритм её построения для восстановления значений NDVI по радарным данным спутниковой системы Sentinel-1 на территорию Калининградской области. Модель позволяет восстанавливать одномоментные измерения и серии NDVI с высоким пространственным и временным разрешением в условиях полного отсутствия измерений в оптическом диапазоне длин волн, добавляя новую информацию о состоянии растительного покрова, которая не может быть получена простой интерполяцией временных рядов спутниковых данных Sentinel-2.

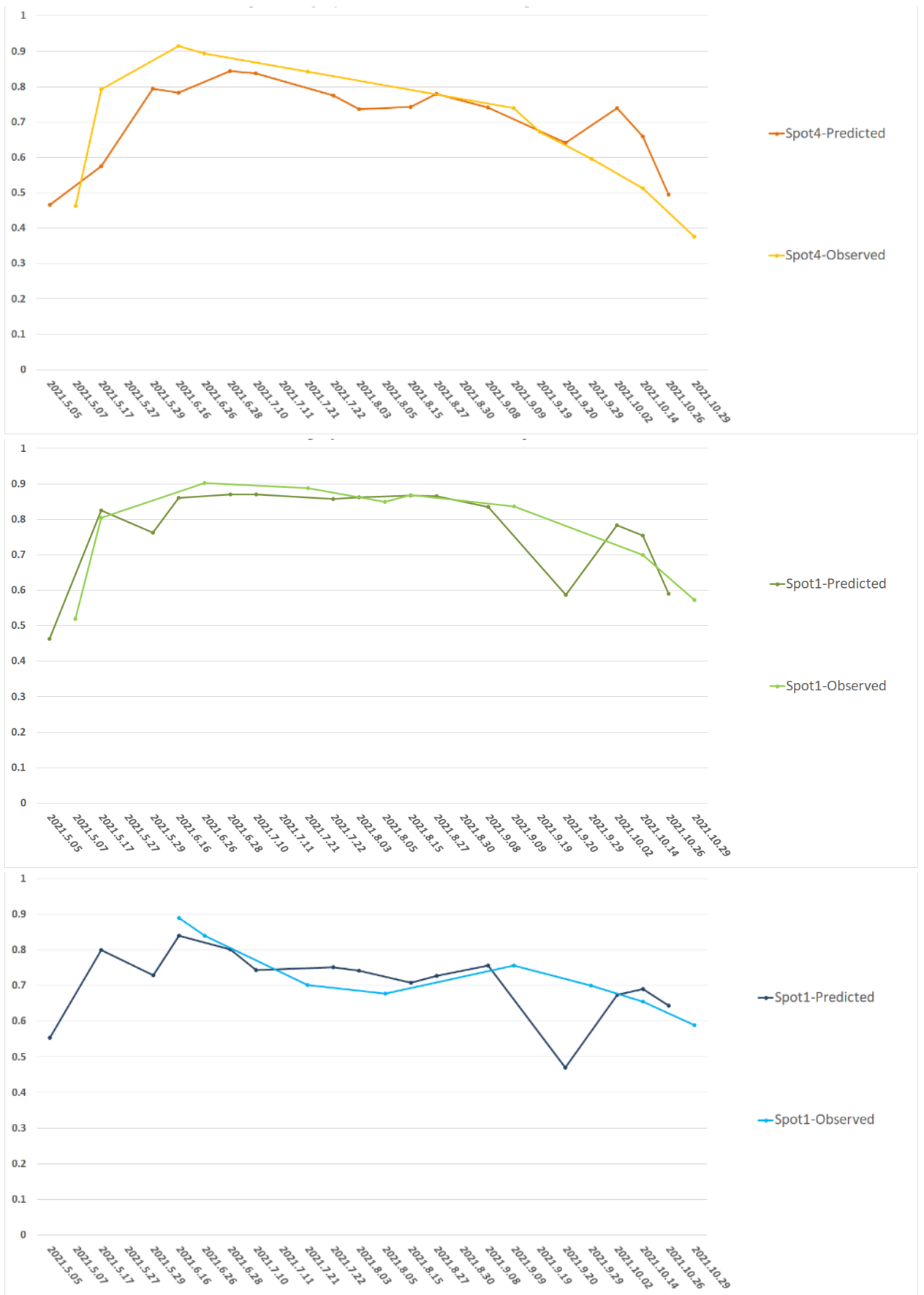


Рисунок 1.1.5.5 — Сравнение исходной (Sentinel-2, светлые линии) и восстановленной (по данным Sentinel-1, тёмные линии) динамики значений NDVI на уровне отдельных пикселей для участка пахотных земель (вверху), лесной растительности (в середине) и луговой растительности (внизу); реальные и восстановленные значения за соседние даты соединены прямыми линиями

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

### ***1.2.1 Развитие объединенной системы работы с данным центров НИЦ «Планета»***

История спутниковой гидрометеорологии перешагнула 60-летний рубеж. При этом подходы и технологии сбора, обработки, архивации и распространения спутниковой информации прошли путь от организации локальной работы с наблюдениями от единичных аппаратов до создания сложных информационных систем, которые обеспечивают возможность распределенной работы с данными, получаемыми от различных спутниковых группировок. За время функционирования метеорологических спутниковых систем принципиально улучшились практически все характеристики получаемых ими данных — периодичность наблюдений, пространственное разрешение, номенклатура доступных приборов, точность измерений и т.д. Вместе с этим намного возросли и объемы получаемой информации. Все это потребовало постоянного развития подходов, методов и информационных технологий организации работы со спутниковой информацией для обеспечения ее эффективного использования при решении задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды.

С использованием подобных подходов и методов в последнее десятилетие в России активно развиваются современные технологии работы со спутниковыми данными и на их основе создаются, внедряются и поддерживаются различные специализированные системы для решения конкретных научных и прикладных задач. Например, в рамках Росгидромета за эти годы был реализован ряд специализированных систем, построенных на подобных принципах. К ним, в частности, можно отнести следующие:

- региональные ГИС-системы комплексного анализа гидрометеорологической обстановки и поддержки принятия решений МЕТЕО-ДВ и МЕТЕО-СИБИРЬ;
- проблемно-ориентированные геоинформационные системы ГИС-Амур, ГИС-Волга и ГИС-Гидрология;
- специализированные системы ГИС «Метеор» и Himawari.

Одним из наиболее ярких примеров реализации этого подхода стала Объединенная система работы с данными (ОСД) НИЦ «Планета» (<http://moscow.planeta.smislab.ru>), созданная в плотной кооперации специалистами Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и НИЦ «Планета» и введенная в эксплуатацию в 2013 г. Система обеспечивает доступ к исходным данным и к продуктам тематической обработки по всей территории России, полученным в Европейском, Сибирском и Дальневосточном центрах приема и обработки спутниковой информации, и предоставляет пользователю не только возможности поиска и заказа данных, но и большой набор инструментов для их анализа, разработанных в ИКИ РАН. ОСД НИЦ «Планета» в настоящее время является одной из немногих отечественных систем, уверенно и быстро переходящих на полноценную сервисную модель предоставления данных, инструментов их обработки и вычислительных мощностей. Сочетание текущих возможностей ОСД НИЦ «Планета» по распределенному анализу и обработке спутниковых данных и возможностей центров НИЦ «Планета» делает созданную систему уникальным инструментом оперативного глобального наблюдения Земли. Особо следует отметить, что расширение ресурсов центров по приему и потоковой обработке данных различных спутниковых систем обеспечивает возможности работы пользователей ОСД НИЦ «Планета» с данными как геостационарных, так и полярно-орбитальных КА ДЗЗ, прием, обработка и распространение которых производится в рамках мероприятий по эксплуатации средств Единой территориально-распределенной информационной системы дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ), заказчиком которых выступает Госкорпорация «Роскосмос». В настоящее время также ведутся работы по интеграции в

нее данных КА «Метеор-М» № 2–3 и подготовка к работе с данными второго КА уникальной системы «Арктика-М», планирующегося к запуску в конце 2023 г. для обеспечения непрерывного мониторинга арктических районов. Все это позволяет использовать систему для решения разных задач дистанционного мониторинга практически для всей территории Земли.

Одной из основных особенностей системы является ее открытость для двунаправленного обмена данными с множеством внешних систем. С одной стороны, система позволяет использовать имеющиеся в ней инструменты анализа и обработки данных в составе пользовательского интерфейса (UI) для работы с информацией, сервисами и ресурсами от внешних информационных систем. С другой стороны, ее технологическая база обеспечивает полноценный, WMS-совместимый программный интерфейс (API) для предоставления сервисов метаданных и данных, при помощи которого данные могут быть интегрированы в другие системы или сервисы. Все это позволяет не только предоставлять различные информационные сервисы внешним системам, но и организовывать виртуальную интеграцию с ними на разных уровнях. Наиболее полная интеграция ОСД НИЦ «Планета» проведена с Центром коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru>) в рамках соглашений РАН и Росгидромета на основе договора о сотрудничестве НИЦ «Планета» и ИКИ РАН. Интеграция направлена на обеспечение возможностей пользователей ОСД НИЦ «Планета» и ЦКП «ИКИ-Мониторинг» работать с объединенными ресурсами обеих систем для решения научных задач в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Интеграция систем позволила использовать фактически уникальные архивы накопленной и поступающей спутниковой информации и результаты ее обработки. Так, суммарная емкость архивов, доступных пользователям систем в режиме онлайн, уже превысила 6 Пб.

Отметим, что на основе имеющихся возможностей ОСД НИЦ «Планета» предоставляет сервисы работы со спутниковыми данными научным и прикладным разным ИСДМ, в том числе:

- Информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ–Рослесхоз), [https://nffc.aviales.ru/main\\_pages/index.shtml](https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml);
- Системе дистанционного мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил (VolSatView, VSV), <http://volcanoes.smislab.ru/static/index.sht>;
- спутниковому сервису See The Sea (STS), ориентированному на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана, <http://ocean.smislab.ru/static/index.sht>;
- создаваемой внутриведомственной информационной системе “Вега–Агрометеоролог”, предназначенной для решения задач агрометеорологии на базе интеграции данных наземных и спутниковых наблюдений.

Внешние системы, получая сервисы ОСД НИЦ «Планета», могут обеспечивать доступ к ним своих пользователей. Эти системы также могут предоставлять доступ ОСД НИЦ «Планета» к своим ресурсам. Таким образом, сегодня с использованием современных технологий работы со спутниковыми данными на базе ОСД НИЦ «Планета» и ЦКП «ИКИ-Мониторинг» фактически создана среда (метасистема), позволяющая объединять возможности специализированных ИСДМ для решения разных научных и прикладных задач. Логическая схема такой среды представлена на рисунке 1.2.1.1.



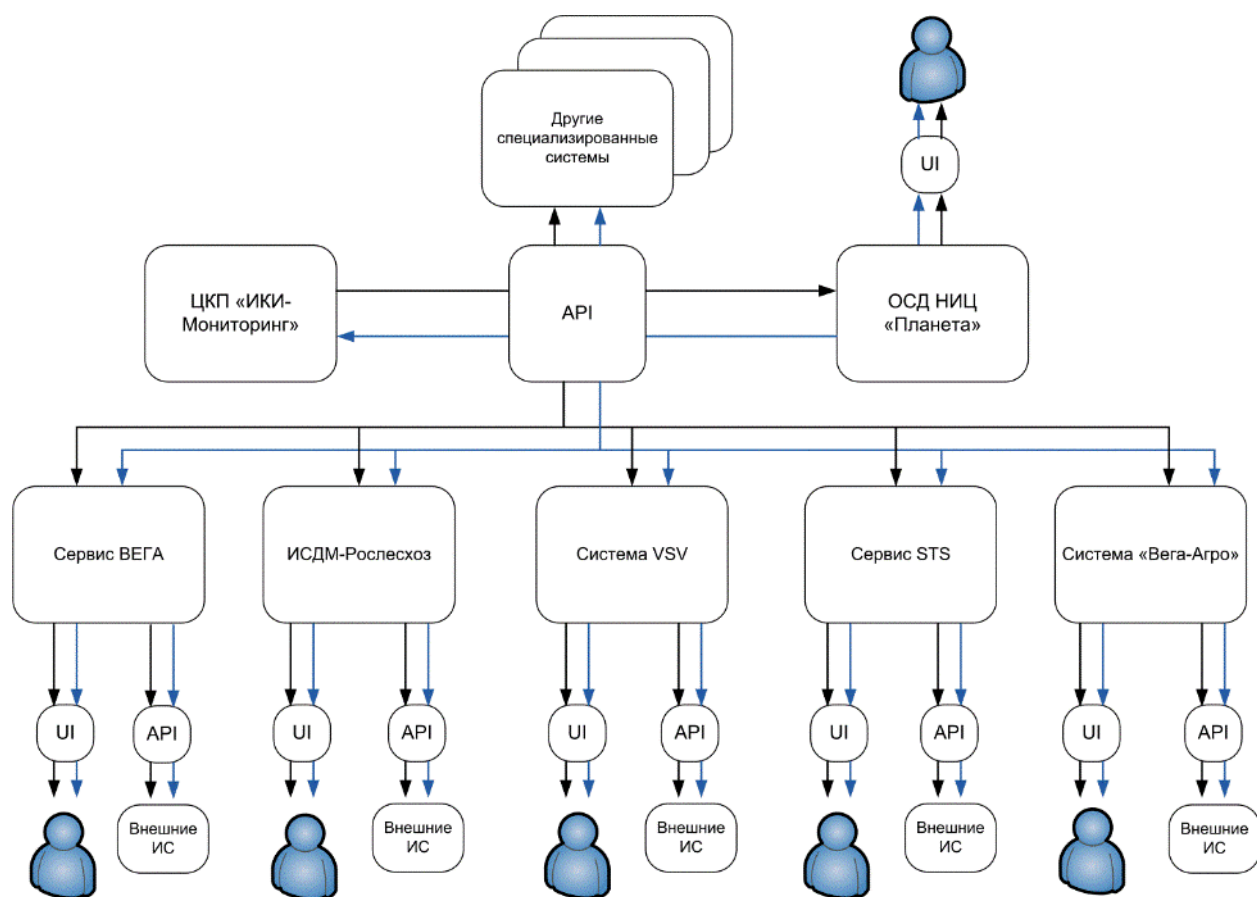


Рисунок 1.2.1.1 — Логическая схема взаимодействия Объединенной системы работы с данными НИЦ «Планета», Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» и различных информационных систем дистанционного мониторинга

### ***1.2.2 Развитие методов спутникового картографирования многолетней динамики использования пахотных земель на основе восстановленных временных серий данных Landsat (на примере Амурской области)***

С 2022 г. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации реализует проект по установлению границ и формированию федеральной карты-схемы земель сельскохозяйственного назначения (ЗСН) в рамках Государственной программы «Эффективное вовлечение в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса», утвержденной постановлением Правительства от 14 мая 2021 г. № 731. Работа выполняется в соответствии с «Методикой установления границ земель сельскохозяйственного назначения и границ зон сельскохозяйственного использования в составе земель населенных пунктов (с установлением границ угодий)», разработанной Государственным университетом по землеустройству и одобренной протоколом заочного заседания секции аграрного образования и сельскохозяйственного консультирования Научно-технического совета Минсельхоза России от 30 января 2023 г.

Согласно Методике, данные спутниковых наблюдений наряду с различными картографическими материалами (архивная землеустроительная документация, данные Единого государственного реестра недвижимости и др.) являются одним из источников сведений о землях сельскохозяйственного назначения. В частности, они используются при картографировании динамики использования пахотных земель за период с середины 1980-х по 2016 гг. (интервалы наблюдения — 1984–1990, 1991–1995, 1996–2000, 2001–2005, 2006–2010, 2011–2016 гг.).

Ранее в рамках работ предыдущего года были описаны автоматические методы и представлены результаты построения тридцатилетних временных серий карт

используемой пашни регионов России на основе данных спутниковых систем серии Landsat. При переносе технологии на ряд регионов, характеризующихся очень низкой и изменчивой частотой повторных наблюдений в течение ряда лет, методы восстановления временных серий безоблачных изображений потребовали дальнейшего развития. В частности, продукты уровня L2 для спутниковых систем Landsat-4 и Landsat-5 обеспечивали лишь треть от номинальной частоты повторных наблюдений для территории Амурской области, которая при этом кратно превышала среднюю площадь европейских субъектов РФ.

Для учёта пространственной вариабельности частоты исходных наблюдений был разработан адаптивный алгоритм весовой гармонической регрессии временных серий, который учитывает число наблюдений в целевом интервале для каждого пикселя. Перед началом построения производится стратификация территории и для каждой страты определяется оптимальная комбинация ширины временного окна и числа гармоник, начиная от наименьшей плотности наблюдений до наибольшей. Наименьшей плотности наблюдений соответствует максимальная ширина окна и наименьшее число гармоник, а наибольшей плотности — минимальная ширина окна и наибольшее число гармоник. Конкретные краевые значения зависят от условий наблюдения целевых лет, для которых производится восстановление. Оптимальная комбинация определяется близостью регрессионной кривой к исходным наблюдениям целевого года в терминах среднеквадратического отклонения. На рисунке 1.2.2.1 приведен пример восстановления временных серий NDVI на основе трёхлетнего окна с двумя и тремя гармониками, где вариант с тремя гармониками оказывается наиболее оптимальным, поскольку минимизирует ошибку восстановления для целевого года.

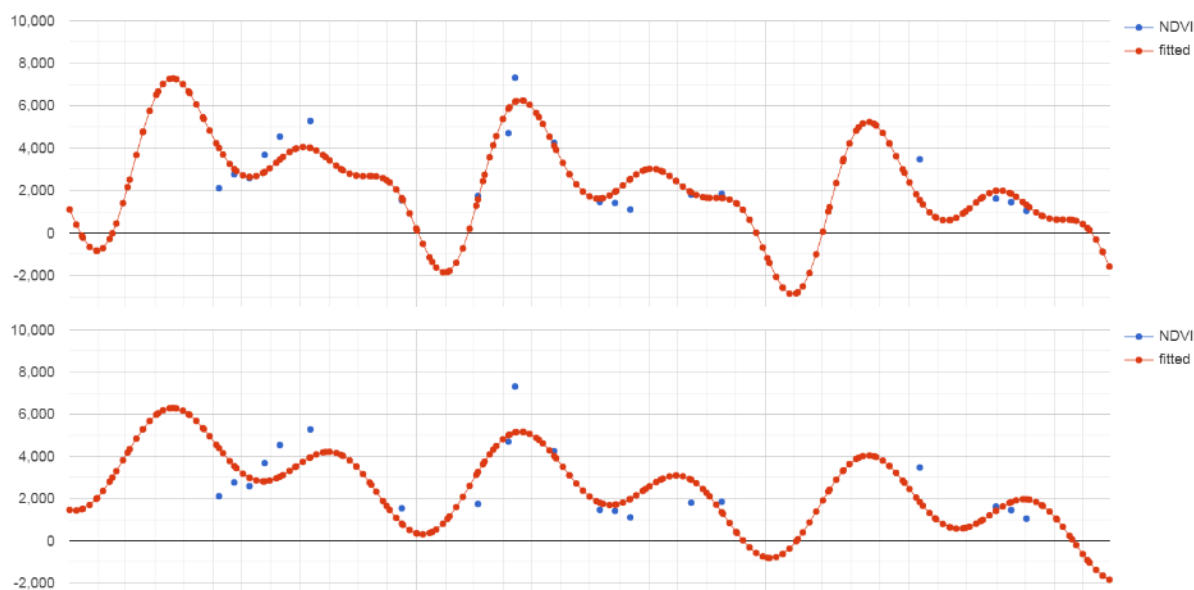


Рисунок 1.2.2.1 — Пример восстановления временных серий на основе трехлетнего окна для трёх (вверху) и двух (внизу) гармоник

Восстановленные временные серии ежедневных наблюдений использовались для создания месячных композитных изображений в интервале с апреля по октябрь каждого года. Пример разновременного синтеза месячных композитных изображений NDVI на основе адаптивного алгоритма весовой гармонической регрессии на юг Амурской области приведен на рисунке 1.2.2.2.



Рисунок 1.2.2.2 — Разновременной синтез месячных композитных изображений NDVI (RGB: май – июнь – июль) за 1986 г. на территорию юга Амурской области в интерфейсе системы Вега

Для автоматического распознавания земель с признаками распашки или сева сельскохозяйственных культур в течение трёхлетнего временного отрезка был использован метод Random Forest, обученный на разметке пахотных земель современного состояния (2020–2022) с использованием, в том числе, спутниковых данных Sentinel-2 (MSI). При создании разметки было использовано следующее определение: пашня — участок земной поверхности, имеющий в течение трёх лет наблюдений признаки распашки, выращивания яровых сельскохозяйственных культур (озимые культуры на рассматриваемой территории не распространены) с минимальным размером не менее 30 м, не находящийся под крышами теплиц и другими объектами или сооружениями, препятствующими дистанционному наблюдению.

Для автоматизированной работы методов распознавания между разновременными наборами признаков, полученными по данным различных приборов программы Landsat, получил дальнейшее развитие метод переноса обучающей выборки. В частности, помимо использования объектного подхода при распознавании целевых классов, автоматически выявляемые объекты применяются при построении характерных значений признаков разделяемых классов. Сопоставление распределений значений признаков производится на основе Q-Q-графиков, что позволяет отождествить распределения с заданным уровнем значимости. Этот подход позволил снизить ошибки сопоставления классов между разновременными наборами признаков.

В целях обеспечения регулярности разновременных оценок, тридцатилетний интервал наблюдений был разбит на шесть пятилетних страт, для каждой из которых была получена карта используемой в течение трёх лет пашни для Амурской области. Анализ временной серии полученных карт позволил идентифицировать последний год использования пашни на уровне отдельных пикселей Landsat (см. рисунок 1.2.2.3).



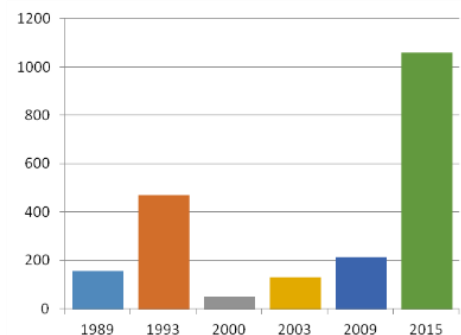
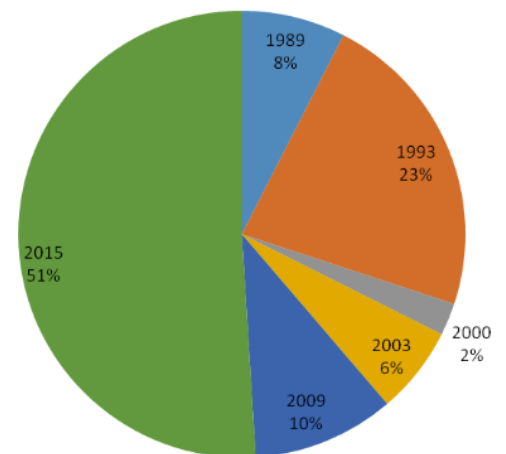
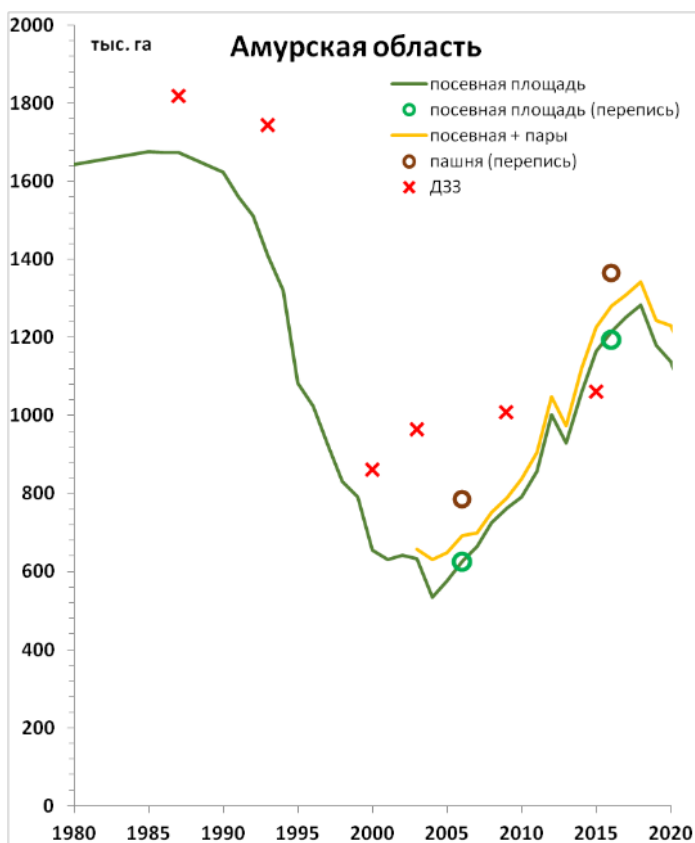
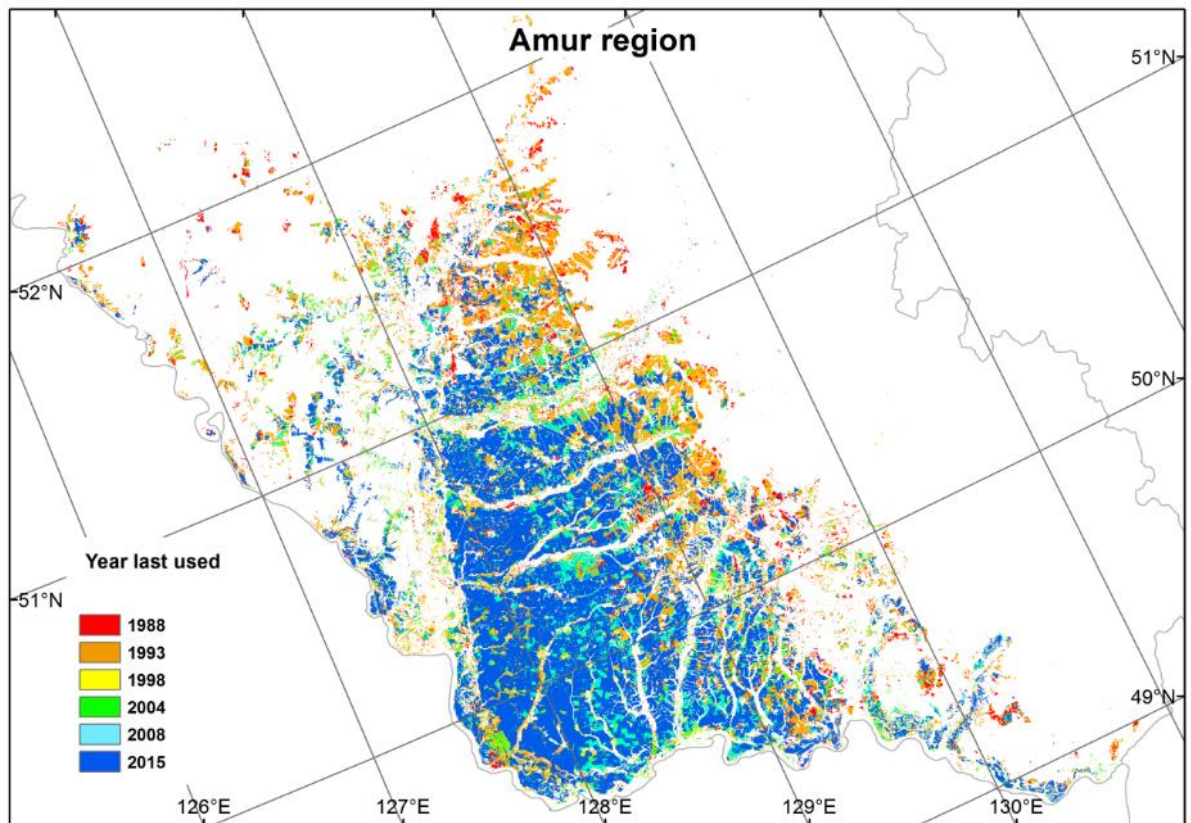


Рисунок 1.2.2.3 — Интегральные результаты динамического картографирования используемых пахотных земель Амурской области с указанием последнего года использования (вверху), динамика различных оценок целевых категорий используемых земель (слева снизу), а также распределение площадей используемой пашни по дате последнего использования (справа внизу)

Сопоставление серии разновременных оценок площадей используемой пашни с данными Госкомстата СССР и Росстата, а также данных Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2006 и 2016 гг. указало совпадение трендов, полученных по данным дистанционного зондирования Земли и из статистических источников. В частности, было подтверждено резкое снижение площади пашни в начале 1990-х гг., когда из оборота было выведено 23 % площадей пахотных земель. Результаты картографирования также подтверждают, что к 2015 г. в обороте осталось чуть более половины площадей используемой пашни Амурской области по отношению к показателю середины 1980-х гг.

Интегральные результаты анализа полученных разновременных карт используемой пашни на Амурскую область, включая дату последнего использования участков и распределение площадей пашни по дате забрасывания, а также сравнение оценок выявленных по данным дистанционного зондирования площадей с данными из различных статистических источников также приведены на рисунке 1.2.2.4.

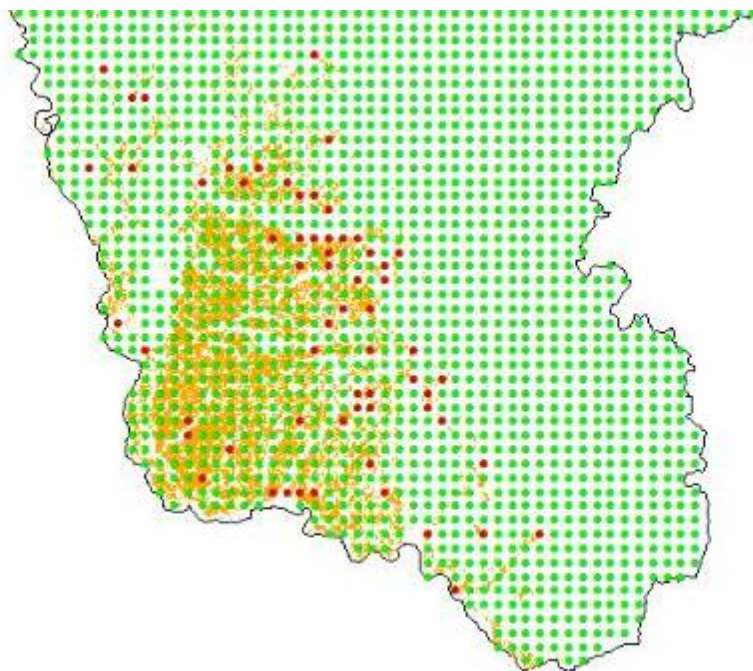


Рисунок 1.2.2.4 — Схема результатов сопоставления экспертной фотоинтерпретации данных высокого пространственного разрешения и автоматически полученной карты пахотных земель Амурской области для 2013–2015 гг. в узлах регулярной сетки 7×7 км: зелёный цвет — верная классификация, красный цвет — ошибка классификации, оранжевый цвет — карта пахотных земель

Для объективной оценки результатов автоматизированного картографирования была проведена валидация карты пахотных земель Амурской области по состоянию на 2013–2015 гг. С этой целью была использована регулярная сеть точек, покрывающая южную часть Амурской области (всю зону потенциального наличия пашни в регионе) с шагом 7×7 км, в узлах которой проводилась экспертная фотоинтерпретация серии снимков высокого пространственного разрешения. В частности, эксперты использовали указанное выше определение класса пахотных земель и временные серии спутниковых данных Landsat и Sentinel-2. При принятии решения, помимо проверки факта распашки, оценивалась текстура и форма объекта, его приуроченность к инфраструктуре (дорогам, населённым пунктам), местонахождение среди других, в том числе, похожих объектов, наличие севооборота, степень зарастания, наличие овражно-балочной сети или следы заболоченности.



После оценки всего комплекса признаков, эксперт принимал решение об отнесении объекта в узле сети к классу «пашня» или «остальное». Всего на юг Амурской области было проинтерпретировано 4529 точек. На последнем этапе результаты экспертной интерпретации сопоставлялись с автоматически полученной картой с последующим созданием матрицы перепутывания. В результате анализа матрицы перепутывания было установлено, что F-score по классу «пашня» составляет 0,87, F-score по классу «остальное» — 0,99, а общая точность бинарной классификации составляет 0,98.

### ***1.2.3 Выделение пахотных земель на основе анализа устойчивых особенностей внутрисезонной динамики наземного покрова в различные годы***

Формируемые по спутниковым данным карты пахотных земель являются продуктом, востребованным при решении различных задач: оценка площадей используемых и неиспользуемых земель, мониторинг ввода земель в оборот и их забрасывания и др. Традиционно такие карты создаются экспертом посредством векторизации объектов, идентифицируемых при визуальном дешифрировании спутниковых снимков, или с использованием различных автоматизированных методов, например, классификации изображений. В последние годы в ИКИ РАН проводятся работы по развитию методов картографирования пахотных земель с использованием алгебры изображений. В настоящем разделе приведены основные результаты этих работ.

Выделение обрабатываемых пахотных земель с помощью алгебры изображений осуществляется исходя из предположения, что для них характерна резкая смена значений вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс) в течение одного или нескольких вегетационных периодов, в то время как другим типам объектов свойственен другой характер изменения индекса с течением времени (например, для антропогенных объектов и объектов гидрографии характерны постоянно низкие значения индекса, а для естественной растительности, напротив, — постоянно высокие). Для учёта этих условий при обработке временного ряда спутниковых данных предложена формула следующего вида:

$$\text{if}(\min(A,B,C,\dots) > (\text{порогNDVI}_1), 2, \text{if}(\max(A,B,C,\dots) < (\text{порогNDVI}_2), 1, 3)),$$

где:

- A, B, C, ... — изображения NDVI за вегетационный период, которые могут быть представлены как безоблачными сценами спутниковых данных, полученными разными спутниковыми приборами, так и композитными изображениями, полученными с различной периодичностью (ежедневными, ежемесячными и т.д.);
- $\text{порогNDVI}_1$  и  $\text{порогNDVI}_2$  — подбираемые экспертом пороговые значения NDVI, свойственные выделяемым классам в зависимости от анализируемой территории и используемых спутниковых данных;
- 1, 2 и 3 — классы, к которым по результатам обработки будет отнесен тот или иной пиксель. К первому классу при этом относятся пиксели с постоянно низкими значениями NDVI, ниже « $\text{порогNDVI}_2$ » (преимущественно объекты гидрографии и антропогенные объекты), ко второму — пиксели с постоянно высокими значениями индекса, выше « $\text{порогNDVI}_1$ » (преимущественно естественная растительность), к третьему — остальные пиксели отобранных изображений, NDVI которых как опускается ниже « $\text{порогNDVI}_1$ », так и поднимается выше « $\text{порогNDVI}_2$ » (преимущественно используемая пашня, на которой в анализируемый период наблюдались признаки распашки и вегетации сельскохозяйственных культур).

Пример расчётов, выполненных в среде «Вега-Science» с использованием приведенной выше формулы, приведен на рисунке 1.2.3.1.

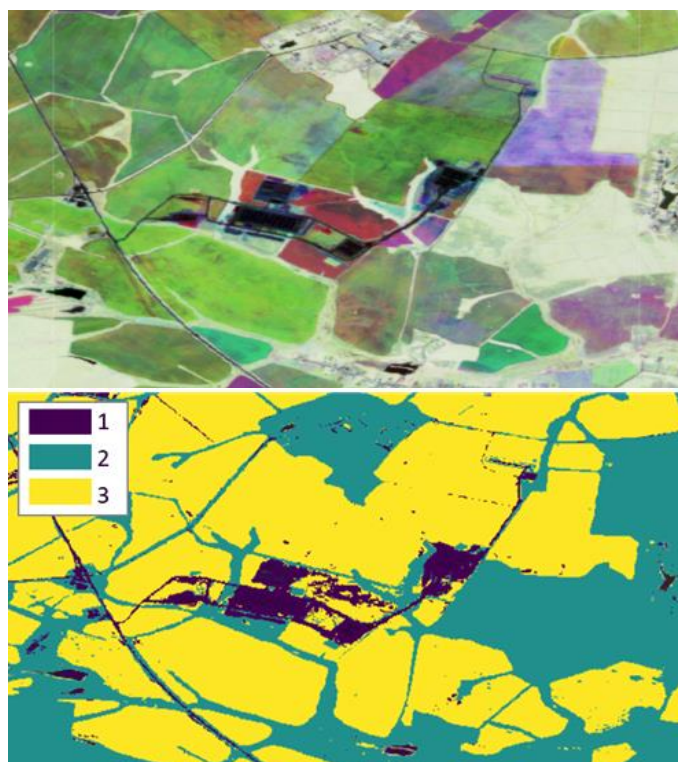


Рисунок 1.2.3.1 — Вверху — многовременное цветосинтезированное изображение NDVI по данным Sentinel-2 (R — сезонный композит за 2021 г., G — за 2022 г., B — за 2023 г.), внизу — результат расчёта на основе трехлетней серии ежедневных композитов NDVI по данным Sentinel-2 трехклассовой карты типов поверхности с использованием алгебры изображений

Для потоковой обработки на основе предложенного подхода большой временной серии спутниковых изображений реализован алгоритм на языке Python с использованием модуля gdal. Обработка происходит в несколько этапов:

- все данные приводятся к одной проекции и одному пространственному разрешению, ограничиваются одной областью интереса (bbox);
- в каждом пикселе собирается временной ряд данных, фильтруются пиксели без значения (nodata);
- осуществляется непосредственно отнесение пикселя к тому или иному классу в соответствии с заданными порогами.

С использованием реализованного алгоритма выполнена серия экспериментов по созданию карт пахотных земель за период 2021–2023 гг. в различных субъектах Российской Федерации. В качестве исходных спутниковых данных использовались ежемесячные композиты Sentinel-2. Ниже приведены результаты оценки достоверности одной из таких карт, сформированных на территорию Городовиковского района Республики Калмыкия.

Оценка достоверности карты проводилась экспертом по регулярной сетке (рисунок 1.2.2.2). Корректность отнесения той или иной точки карты к классу «используемая пашня» или «не пашня» оценивалась путём визуального дешифрирования разновременных спутниковых изображений Sentinel-2. Из 1094 проанализированных точек ошибка выявлена в 16 случаях, таким образом, общая достоверность карты составила 98,5 %.

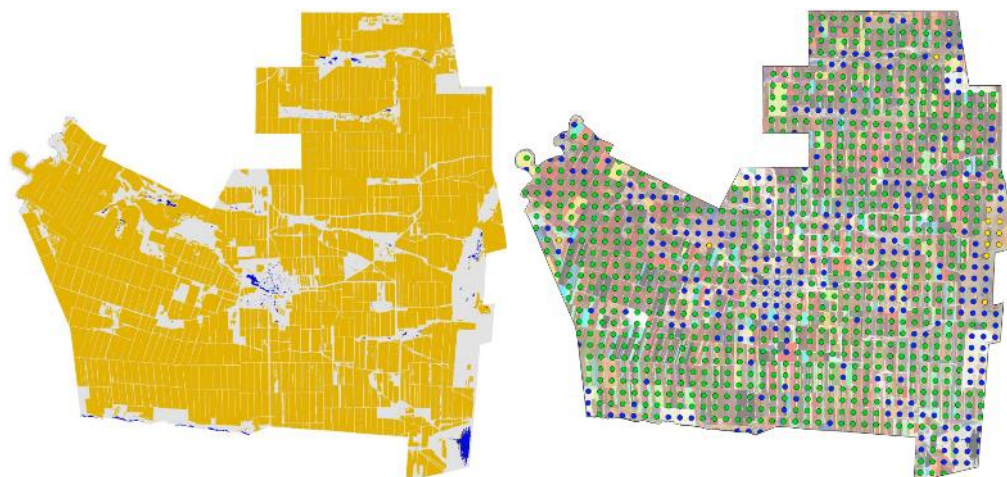


Рисунок 1.2.3.2 — Слева — карта пахотных земель Городовиковского района Республики Калмыкия, полученная с использованием алгебры изображений на основе трехлетней (2021–2023) серии ежемесячных композитов NDVI по данным Sentinel-2, справа — регулярная сетка, использованная для оценки достоверности карты (зеленые точки — пашня по маске и по результатам экспертной оценки, синие — не пашня по маске и по результатам экспертной оценки, желтые — выявленные ошибки)

#### ***1.2.4 Разработка автоматизированной системы совместного анализа спутниковых и статистических данных для оценки урожайности сельскохозяйственных культур***

Прогнозирование урожайности посевов сельскохозяйственных культур представляет интерес для широкого круга потребителей: от министерств сельского хозяйства (страны или отдельных регионов) до отдельных сельхозтоваропроизводителей. Важное значение для решения этой задачи имеют методы, позволяющие получать заблаговременные оценки ожидаемой продуктивности посевов на больших территориях, основанные на использовании данных спутниковых наблюдений.

На протяжении последних нескольких лет в ИКИ РАН проводились эксперименты по оценке урожайности сельскохозяйственных культур с использованием возможностей сервиса спутникового мониторинга Vega-Science на уровне субъектов Российской Федерации. Возможность получения таких оценок основана на наличии тесной связи между максимальными значениями вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, нормализованный разностный вегетационный индекс) озимых и яровых культур, полученными на основе данных спутниковых наблюдений (при проведении экспериментов использованы данные спутниковых приборов MODIS), с урожайностью озимых зерновых и яровых зерновых и зернобобовых соответственно (в качестве источника данных об урожайности используется ЕМИСС — Единая межведомственная информационно-статистическая система Росстата, <https://www.fedstat.ru/>). Примеры графиков, иллюстрирующих такую связь, приведены на рисунке 1.2.4.1.



*а*



*б*

Рисунок 1.2.4.1 — Графики, иллюстрирующие связь максимальных значений NDVI:  
*а* — озимых культур с урожайностью озимой пшеницы в Ставропольском крае;  
*б* — яровых культур с урожайностью яровых зерновых и зернобобовых в Республике Татарстан за период с 2001 по 2022 г.

В продолжение этих экспериментов написана программа, автоматизирующая процесс сбора и совместной обработки статистической и спутниковой информации для оценки ожидаемой продуктивности посевов сельскохозяйственных культур.

Программа представляет собой консольное приложение. Взаимодействие с ней происходит путем последовательного ввода команд на запрос, обработку и вывод информации. Программа автоматически запрашивает следующую информацию:

- из «Вега-Science» — еженедельные значения NDVI, усредненные по участкам, занятым озимыми или яровыми культурам в анализируемом регионе;
- из ЕМИСС — ежегодные значения урожайности заданной сельскохозяйственной культуры или группы культур в заданном регионе.

Соответствующие значения извлекаются с 2001 г. Кроме того, программа может использовать дополнительную информацию, предварительно подготовленную пользователем:

- об урожайности — из бюллетеней о состоянии сельского хозяйства, публикуемых Росстатом в формате excel (<https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13277>). Использование этого источника оказалось актуальным для получения сведений об урожайности за 2022 г., поскольку в ЕМИСС они не были опубликованы;
- об урожайности и NDVI, полученную с эталонных полей.

Программа анализирует временные ряды NDVI и извлекает максимальные значения за каждый год, после чего рассчитывает коэффициент корреляции между этими значениями и показателями урожайности соответствующих лет. По каждому региону

также строятся регрессии двух типов: линейная и экспоненциальная (в ряде случаев было отмечено, что данные лучше аппроксимируются с помощью экспоненциальной зависимости).

На основе регрессий и максимального значения NDVI анализируемого года рассчитывается прогнозное значение урожайности. На основе ретроспективных данных об урожайности и максимумах NDVI рассчитывается также точность прогноза, которая характеризуется средней абсолютной ошибкой.

Вся полученная программой информация автоматически экспортируется в виде графиков в формате .jpg и .pdf, а также размещается в отчеты двух форматов: doc и xls. Фрагмент сформированного отчета в формате Microsoft Word приведен на рисунке 1.2.4.2.

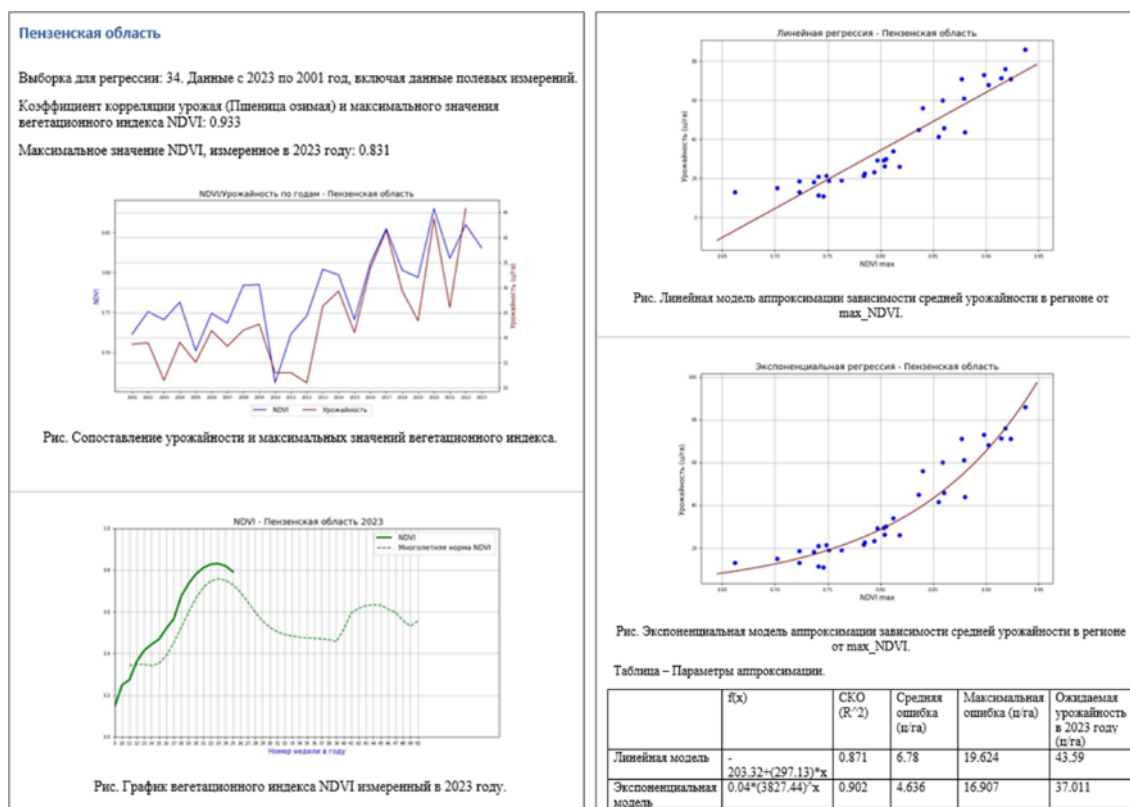


Рисунок 1.2.4.2 — Фрагмент отчёта, формируемого в автоматическом режиме программой, предназначенной для оценки урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых и статистических данных

### 1.2.5 Метод получения информации о местах произрастания сельскохозяйственных культур на основе хода индекса NDVI на поле

В данном разделе описываются разработанные в ИКИ РАН методы верификации и классификации информации о сельскохозяйственных культурах на полях, основанные на анализе хода среднего значения индекса NDVI на поле в течение сезона. В качестве входной информации выступают контура полей, ряды ежедневных или семидневных композитных изображений на основе спутниковых данных, а также наземная или экспертная информация о культурах на полях. Разработанные методы позволяют только на основе спутниковых данных определить степень достоверности полученной наземной или экспертной информации, найти возможные ошибки и провести классификацию культур на других полях.

Актуальность работы обусловлена тем, что при проведении дистанционного мониторинга в области сельского хозяйства часто возникают различные прикладные задачи, в которых без масштабных наземных обследований нужно получить объективную информацию о местах произрастания сельскохозяйственных культур на полях.



В независимом способе получения информации о сельскохозяйственных культурах на полях заинтересованы органы исполнительной власти, сельхозпроизводители, научные организации. В каждом случае набор, полнота и качество имеющейся информации сильно разнится, она может быть недостоверна и неполна. Например, имеющаяся у органов исполнительной власти информация о типах культур в отдельных районах может содержать в рамках одного класса ошибки, превышающие половину всей выборки. Кроме того, получение информации о сельскохозяйственных культурах на полях может потребоваться как на достаточно ограниченной территории, так и в масштабах нескольких регионов или страны.

В основе подхода лежат две гипотезы:

- Полученный по спутниковым данным ход индекса NDVI различен у разных культур. В случае одинакового хода для разных культур они считаются неразделимыми и учитываются как одна.
- Все поля с одной сельскохозяйственной культурой ведут себя одинаково в пределах локальной территории.

Вне зависимости от особенностей имеющейся наземной информации, разработанный подход предполагает следующие основные операции:

- Расчет для каждого поля средних значений и формирование рядов хода NDVI в течение сезона по спутниковым данным.
- Выделение основных трендов на основе кластеризации.
- Сопоставление трендов и культур по входной информации или с помощью эксперта.
- Поиск ошибок во входных данных и их переклассификация.
- Классификация культур на неразмеченных полях (с отсутствующей информацией о культурах).

Ряды NDVI на полях формируются в базовом варианте по данным прибора MODIS (спутники AQUA и TERRA). Используются сглаженные интерполированные ежедневные или семидневные ряды композитных изображений индекса NDVI. Несмотря на низкое пространственное разрешение, эти данные обладают высоким временным разрешением. Возможность использования данных с низким пространственным разрешением для полей субпиксельного размера была оценена ранее, в 2022 г. Также в отдельных случаях возможно формирование рядов по данным приборов MSI (спутники серии Sentinel-2), KMCC (спутники серии Метеор), VIIRS (спутники серии NOAA, Suomi NPP).

Кластеризация выполняется методом OPTICS, ее главная задача — найти в выборке все характерные тренды. Далее на основе расстояния между средним за каждую неделю для каждой культуры каждый выделенный тренд сопоставляется с одной или несколькими культурами. В качестве метрики используется евклидово расстояние. На последнем этапе для каждого поля оценивается его расстояние до каждого выделенного тренда. В случае расхождения поле не проходит проверку и ему приписывается культура ближайшего тренда. Пороги для сопоставления и настройки кластеризации подбираются в интерактивном режиме для каждого случая.

Примеры результатов верификации приведены на рисунке 1.2.5.1. Выборка и тренды, приведенные на рисунке 1.2.5.1, получены для культур 2020 г. для одного из районов Воронежской области. Для краткости приведены не все культуры выборки. Зеленым цветом приведен ход NDVI в сезоне для полей с подтвержденной культурой, красным цветом — культура для которых не подтверждена. Также приведены все поля каждой указанной культуры после переклассификации, тогда синим цветом указаны поля, культура для которых была изменена в результате обработки.

Результаты работы могут использоваться для контроля достоверности получаемой информации о культурах, планирования наземных обследований и принятия управленческих решений.

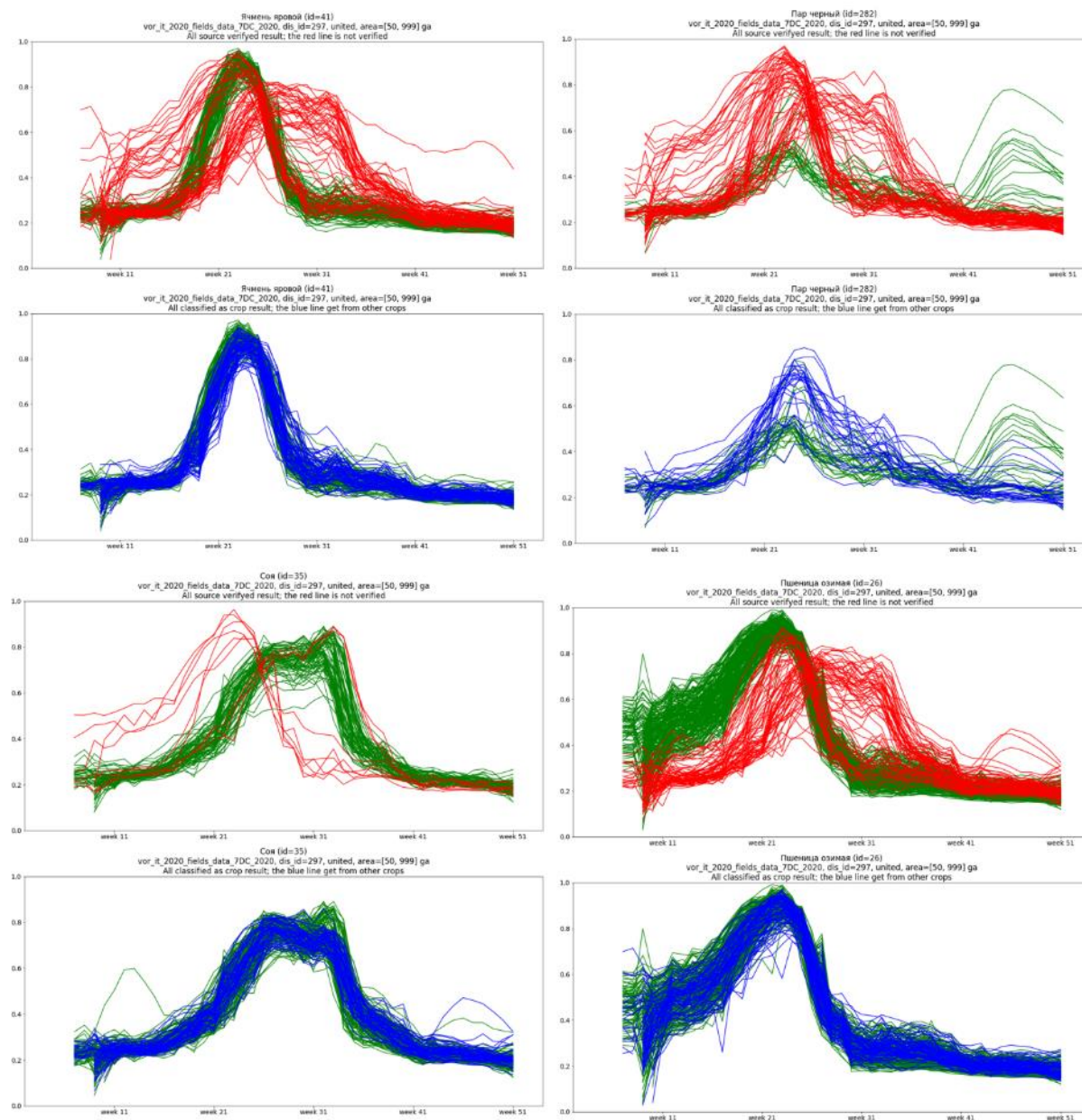


Рисунок 1.2.5.1 — Ход среднего значения индекса NDVI на полях выборки с разными сельскохозяйственными культурами. По оси абсцисс везде указан номер недели года. По оси ординат указано значение индекса NDVI

### ***1.2.6 Результаты исследования эффективности разносезонной информации для спутникового картографирования озимых культур в весенне-летний период вегетации***

В рамках работ за отчетный период было проведено исследование возможности повышения точности распознавания озимых культур путём обучения и применения универсальной разносезонной модели на основе непараметрического классификатора с использованием в качестве признаков ежедневных безоблачных изображений вегетационного индекса NDVI, полученных за ряд архивных лет. Ранее было показано, что разносезонные данные, описывающие фенологию сельскохозяйственных культур, способствуют улучшению результатов распознавания широкого набора культур целевого

сезона вегетации. Для решения задач автоматического оперативного спутникового агромониторинга территории России необходимо использовать ежедневную информацию, характеризующую актуальное состояние и динамику биомассы сельскохозяйственных культур, которая, в частности содержится в ежедневных композитных изображениях, восстановленных на основе весового подхода и метода интерполяции LOWESS. Также ранее было показано, что разработанный в ИКИ РАН автоматический метод для оперативного распознавания озимых культур России на национальном уровне пространственного характеризуется региональной точностью от 70 до 98 %, однако указанный метод ограничивается использованием спутниковых данных, соответствующих только одному целевому сезону вегетации озимых.

В рамках исследования были задействованы архитектуры Random Forest и XGBoost, которые являются классическими непараметрическим классификаторами, стойкими к переобучению и демонстрирующие высокую точность на похожих задачах дистанционного зондирования Земли. Необходимо отметить, что входные разносезонные данные имели объем порядка нескольких сотен гигабайт, существенно превышая лимиты оперативной памяти на стандартном процессоре, поэтому в программной реализации были задействованы методы обработки и анализа больших данных, а также подходы по оптимизации алгоритмов с использованием технологии CUDA.

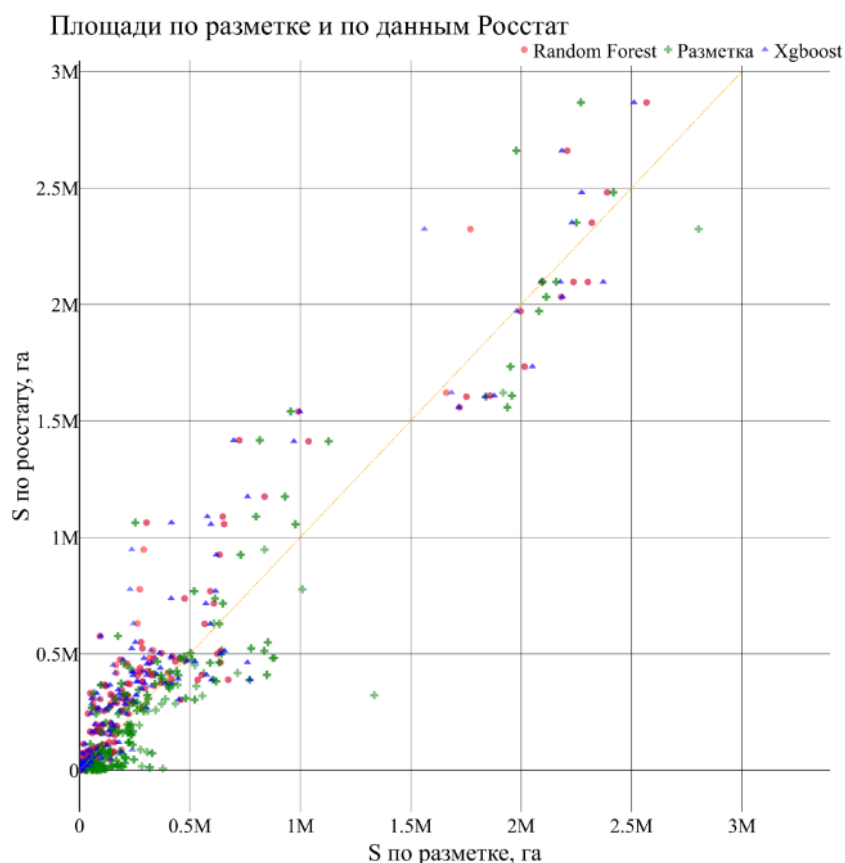


Рисунок 1.2.6.1 — Диаграмма рассеяния для площадей озимых по данным односезонного алгоритма (разметка — зелёные маркеры), двум разносезонным моделям (random forest — красные маркеры, xgboost — синие маркеры) и данным Росстат для 43 субъектов РФ за пять последовательных сезонов вегетации (с 2015 по 2019 годы)

В результате работы были обучены разносезонные модели на основе архитектур Random Forest и XGBoost, с помощью которых были получены сезонные карты размещения озимых культур для 43 субъектов преимущественно Европейской части РФ для каждого из сезонов вегетации в интервале с 2015 по 2019 г. Рассчитанные на основе этих карт региональные площади озимых сравнивались с соответствующими площадями,

извлеченными из стандартных односезонных карт озимых (разметкой) и данных Росстат с расчетом метрик стандартного отклонения (RMSE) и коэффициента детерминации ( $R^2$ ). На агрегированной за пять лет диаграмме рассеяния (рисунок 1.2.6.1) красные метки соответствуют модели Random Forest, синие — XGBoost, а зелёные — картам на основе односезонного алгоритма.

Оценки значений стандартного отклонения (рисунок 1.2.6.2,верху) и коэффициента детерминации (рисунок 1.2.6.2,внизу) были получены для каждого из пяти сезонов для территории 43 субъектов РФ из региона исследования. Результаты разносезонной модели Random Forest обозначены на этих рисунках красным цветом, по XGBoost — синим, по данным односезонного алгоритма — зелёным. Графики демонстрируют систематическое улучшение оценок площадей, полученных с помощью обеих разносезонных моделей в сравнении с оценками по данным односезонного подхода (разметкой). В частности, было обнаружено, что среднеквадратическая ошибка отклонения от данных Росстат по данным модели Random Forest оказалась ниже в среднем на 26,6 тыс. га, а коэффициент детерминации вырос в среднем на 3,7 %. Будучи в среднем хуже, чем Random Forest, XGBoost в среднем также демонстрирует улучшение результатов в сравнении с односезонным алгоритмом, однако результаты этой модели выглядят менее устойчивыми между сезонами.

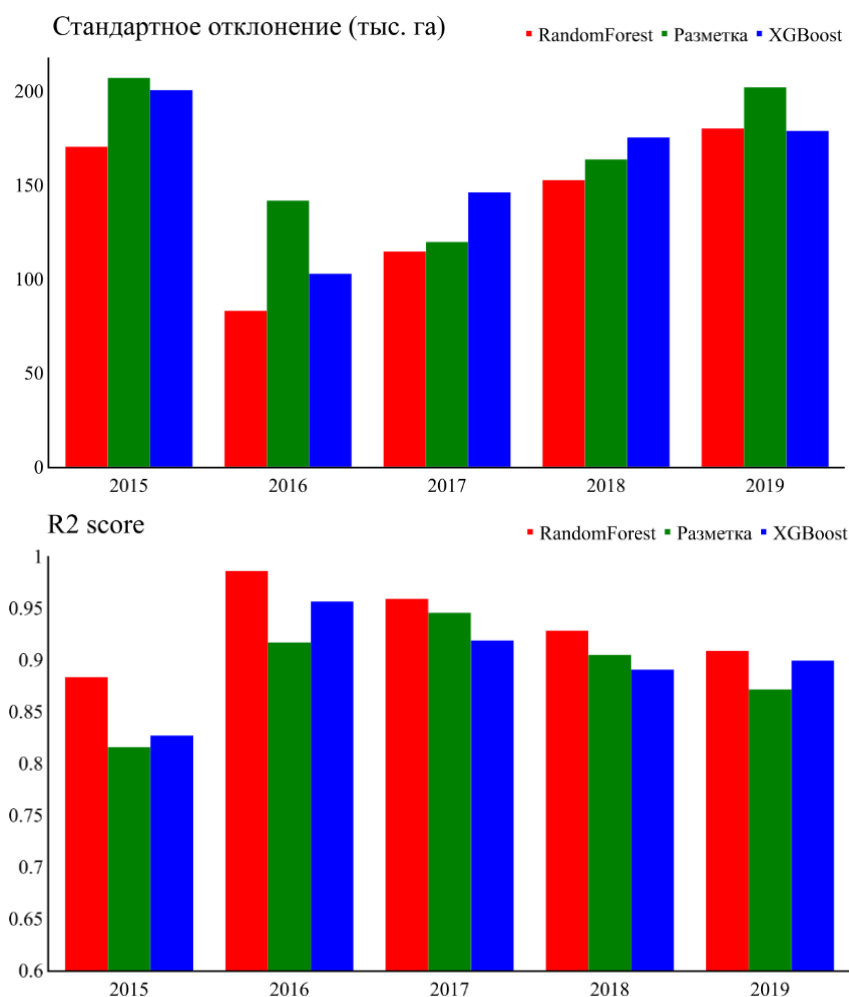


Рисунок 1.2.6.2 — Стандартное отклонение площадей детектируемых озимых от площадей Росстат (вверху) и коэффициент детерминации  $R^2$  (внизу) при сопоставлении площадей с данными Росстат по результатам работы односезонного алгоритма (разметка) и двух разносезонных моделей (random forest и xgboost) для территории 43 субъектов Европейской части РФ

Таким образом, в рамках выполненных работ были параметризованы и на основе больших объемов спутниковых данных обучены разносезонные модели непараметрических классификаторов для распознавания озимых культур текущего сезона вегетации на больших территориях. В процессе построения моделей была проведена их существенная оптимизация, что привело к значительному сокращению временных затрат на обучение. Было показано, что с использованием разносезонных спутниковых данных можно создать универсальную модель, которая в среднем лучше справляется с задачей субнационального распознавания озимых культур, чем метод, основанный на данных только текущего сезона вегетации. Разносезонная модель Random Forest показала себя лучше всех исследуемых подходов, что может объясняться высокими характеристиками этого метода, в частности, высокой обобщающей способностью и стойкостью к переобучению, которые превосходят аналогичные характеристики многих других методов машинного обучения.

### **1.3 Поддержка (включая формирование и ведение сверхбольших архивов спутниковых данных и результатов их обработки) 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 2023 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 «Vega-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, для ряда задач также используются решения на базе PostgreSQL, в качестве HTTP-сервера — Apache/nginx, а для обработки спутниковых изображений активно применяются такие программные пакеты, как GDAL/OGR, GRASS GIS, Proj, Imager, а также специализированные пакеты для обработки спутниковых данных — SeaDAS, SNAP, OpenCV и др.

В 2023 г. были продолжены работы по совершенствованию используемых нами для задач ведения долговременных архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» технологий и программного обеспечения. В частности, были проведены работы по распределению точек входа для пополнения наиболее нагруженных архивов, чтобы избежать отказов в усвоении данных при массированных обработках однотипной информации. Кроме того, были задублированы и введены в работу каталоги высоконагруженных баз данных архивов для обеспечения отказоустойчивости и распределения нагрузки при доступе пользователей и внешних информационных систем к информации.

Функционирование ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в настоящее время обеспечивает сложный программно-аппаратный комплекс, состоящий более чем из 200 серверов различного назначения, работающих под управлением операционных систем семейств UNIX и Windows. Для хранения файлов спутниковых данных используется 30 UNIX-серверов и 6 специализированных систем хранения (NAS), а для обработки спутниковых данных, включая динамическое формирование требуемых для интерфейсов информационных продуктов — более 200 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 2023 г. возможности ЦКП были существенно расширены за счёт интеграции с программно-аппаратным комплексом ИАС «Углерод-Э». Было введено в строй больше 15 серверов различного назначения, в первую очередь для обеспечения виртуализации, а также расширена дисковая система хранения, суммарная дисковая ёмкость, доступная для хранения данных в настоящее время составляет около 14 Пбайт.

### ***1.3.3 Архивы спутниковых данных и их наполнение в 2023 году***

В настоящее время архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» содержат данные более чем 50 различных приборов наблюдения, получаемых с более чем 55 российских и зарубежных спутников ДЗЗ. Постоянно расширяется зона интересов, по которой в центре осуществляется сбор и архивация данных, которая по большей части зависит от интересов

проектов, использующих возможности центра. Благодаря сотрудничеству ИКИ РАН и «НИЦ «Планета» пользователи центра имеют возможность работы с глобальными покрытиями данных, получаемых некоторыми российскими системами наблюдений. Кроме этого, также реализован доступ к некоторым из данных, содержащихся в архивах ЕТРИС ДЗЗ. Область покрытия данными спутников Landsat и Sentinel, имеющимися в архивах центра, в настоящее время составляет около 30 % площади поверхности земли. В эту область входит вся Северная Евразия, включая арктические территории, приграничные моря России, а также ряд регионов в Африке, Азии, Северной и Южной Америке. Существенно, что в архивах центра в настоящее время накоплены достаточно длинные ряды данных. Например, архивы данных спутников серии Landsat начинаются с марта 1984 г.

В 2023 г. в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» поступило более 0,6 Пбайт новых спутниковых данных. Были существенно модернизированы схемы поступления данных КА семейства Sentinel в связи со сменой порталов доступа и программных интерфейсов для этого. Кроме того, были начаты работы по обновлению архивов данных КА серии Landsat для замещения данных коллекции 1 (Landsat Collection 1, C1) на данные коллекции 2 (Landsat Collection 2, C2), архивы которых были опубликованы в этом году, а также по накоплению данных Landsat C2 с атмосферной коррекцией. Помимо этого, было организовано поступление в архивы данных КА Landsat-9 и радарного альтиметра SRAL КА серии Sentinel-3.

В 2023 г. была проведена ревизия и оптимизация архивов данных высокого и среднего разрешений, а также архивов композитных изображений, в том числе по причине замены данных КА Landsat на данные Коллекции 2, а также замены данных КА Sentinel-2 на атмосферно скорректированные с уменьшенным набором спектральных каналов. Были удалены дублирующиеся данные, данные неактуальных версий обработки и данные с предельными значениями покрытия облачностью. Кроме того, была пересмотрена политика сбора данных в сторону её ужесточения с точки зрения максимально допустимого покрытия облачностью и территорий интереса, что также несколько снизило объёмы получаемых данных. В результате суммарный объем архивов спутниковых данных, доступных пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг» увеличился только на 200 Тбайт и достиг 5,6 Пбайт. При этом ежедневно в архивы поступает около 2,5 Тбайт новых данных. Информация о составе архивов спутниковых данных, доступных пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг», по состоянию на 13.12.2023 приведена в таблицах 1.3.3.1 и 1.3.3.2. Детальная информация о наличии данных в архивах может быть получена по ссылке <http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=6>.

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

Тип данных	Кол-во	Размер, Гбайт
Данные радиолокационных спутников	1 993 135	889 053
Данные низкого разрешения (>1 км)	7 185 500	7 383
Данные среднего разрешения (100 м — 1 км)	7 333 486	533 942
Данные высокого разрешения (<100 м)	42 735 957	4 392 533

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

Тип данных	Кол-во	Размер, Гбайт
Данные геостационарных спутников	6 329 831	167 080
Данные низкого разрешения (>1 км)	1 100 991	19 025
Данные среднего разрешения (100 м – 1 км)	3 579 500	111 836
Данные высокого разрешения (<100м)	2 843 085	231 082

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

В архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» также содержатся метеоданные NCEP/NCAR по всему земному шару, получаемые из Национального центра атмосферных исследований NCAR (<https://ncar.ucar.edu/>) с 2000 г. по настоящее время. В состав метеоданных входят данные реанализа на регулярной сетке с шагом  $0,5^\circ$  (ds093.0/ds094.0) и данные прогноза на регулярной сетке с шагом  $1^\circ$  (ds335.0).

### ***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 1500 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,
- думы 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 SO<sub>2</sub> 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 2023 г. состав доступных пользователям информационных продуктов был расширен за счёт добавления данных, получаемых с КА Landsat-9, добавления потока данных Landsat с атмосферной коррекцией, а также данных радарного альтиметра SRAL КА Sentinel-3, ведутся работы по интеграции данных, поступающих с КА «Метеор-М» № 2–3. Кроме того, были существенно улучшены продукты по детектированию тепловых аномалий по данным приора МСУ-МР КА серии «Метеор-М».

В 2023 г. было также реализовано в архивы поступление целого ряда новых композитных информационных продуктов, основные из которых приведены ниже:

- новая улучшенная версия ежедневных интерполированных композитов отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, а также индекса NDVI по данным приборов КМСС;
- ежедневные интерполированные композитные изображения по данным MSI/Sentinel-2;
- композитные продукты для определения гарей в лесах по данным VIIRS/Suomi NPP;
- ежедневные зимние композиты по данным MODIS в красном и ближнем инфракрасном диапазоне;

### ***1.3.5 УНУ «Vega-Science» и развитие её в 2023 году***

«Vega-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. «Vega-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. «Vega-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 состояния растительного покрова Северной Евразии, включая Россию и близлежащие страны. По любому району этой территории в архивах имеются данные с начала двадцать первого столетия. Важнейшим преимуществом реализованного сервиса является поддержка широкого спектра инструментов для обработки и анализа данных в режиме, приближенном к реальному времени.

В 2023 г. были проведены работы по усовершенствованию многофункционального картографического веб-интерфейса, использующего тайловый подход к отображению



данных с использованием библиотеки Leaflet. Основным направлением работ стала оптимизация реализованного программного обеспечения, что позволило существенно повысить скорость работы интерфейса.

Также в 2023 году были продолжены работы по совершенствованию реализованных в системе интерактивных инструментов для анализа и обработки спутниковых данных в режиме «онлайн». Так, в систему был добавлен блок работы с данными радарной альтиметрии для анализа состояния внутренних водоёмов (см. разд. 1.1.3 настоящего отчёта).

### ***1.3.6 Научные и прикладные информационные системы, использовавшие возможности ЦКП в 2023 году***

На основе предоставляемых ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ресурсов по доступу и обработке спутниковых данных в 2023 г. функционировало более 15 различных специализированных систем научных проектов, в частности:

- Информационная система «Аврора-Арктика» (<http://dev.aurora.geosmis.ru/>), разработанная в ИКИ РАН и введённая в опытную эксплуатацию в 2017 г. Система ориентирована на работу с данными наблюдений ионосферы Земли, полученных со спутников серии DMSP, показателей наблюдения солнечного ветра по данным NOAA, метеорологических данных, а также данных спутниковых наблюдений в оптическом диапазоне, полученных различными системами (MODIS, AVHRR и др.) и прогностической информацией о границах аврорального овала.
- Для распределённой работы с данными, получаемыми различными научными миссиями, связанными с исследованием Марса, в 2017 г. с использованием технических и технологических возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в ИКИ РАН была создана специализированная информационная система ARES — Analysis, Research and Exploration Service. При построении системы использовались методы и схемы работы со сверхбольшими архивами данных, 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;
  - Действующий прототип центрального информационного узла ИАС «Углерод-Э» (<http://carbon.geosmis.ru>), созданный в рамках выполнения важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) посвященного созданию национальной системы мониторинга климатически активных газов;
  - Спутниковый сервис SEE THE CASPIAN SEA (STCS, [http://caspien.geosmis.ru/c\\_static/index.sht](http://caspien.geosmis.ru/c_static/index.sht)), созданный в 2023 г. для решения междисциплинарных задач исследования Каспийского моря в рамках Договора с Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва) при поддержке гранта РФФИ № 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования». Особое внимание в системе уделяется возможностям работы с данными спутниковой радиолокации, радиометрии и спектрорадиометрии;
  - Технология контроля данных сельскохозяйственной микропереписи (ТКДСМ, информационный сервер по адресу <http://agrocensus21.geosmis.ru/>).

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 2023 г. такие разработки, в частности, внедрялись в следующие 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.
- ВЕГА-PRO (<http://pro-vega.ru/>) — профессиональный информационный сервис анализа данных спутниковых наблюдений для оценки и мониторинга возобновляемых биологических ресурсов. В основу сервиса легли многолетние разработки в отделе технологий спутникового мониторинга ИКИ РАН в области автоматизированных методов и технологий сбора, обработки и распространения спутниковых данных. Сервис ВЕГА-PRO был создан в 2013 г. совместно специалистами ИКИ РАН и Института космических исследований Земли (ООО «ИКИЗ») при поддержке фонда Сколково. Поддержку работы сервиса ВЕГА-PRO осуществляет ООО «ИКИЗ», компания-участник Кластера космических технологий и телекоммуникаций Сколково. Сервис ориентирован в основном на

специалистов, работающих в области сельского и лесного хозяйства. Его задача — обеспечение возможности контроля текущего состояния растительности на интересующем специалиста объекте (с/х полях, участках пастбищ, сенокосах, лесах и т.п.). В настоящее время сервис осуществляет постоянный мониторинг около 300 000 объектов.

- 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;
- Технология контроля данных сельскохозяйственной микропереписи (ТКДСМ, информационный сервер по адресу <http://agrocensus21.geosmis.ru/>) — система контроля данных, которая создается как инструментальная основа обеспечения объективного контроля достоверности собранных в ходе сельскохозяйственной микропереписи 2021 г. (СХМП-2021) статистических данных о площади различных категорий сельскохозяйственных угодий на основе данных дистанционного зондирования со спутников, технологий их обработки и предоставления соответствующей информационной поддержки установленным группам пользователей.

### **1.3.7 Пользователи ЦКП**

В 2023 г. возможностями ЦКП «ИКИ-Мониторинг» пользовались более 130 организаций (<http://ckp.geosmis.ru/default.aspx?page=7>). При этом новыми пользователями ЦКП стали 10 организаций:

1. ФГБУН Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Республика Бурятия, Улан-Удэ;
2. ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия (ФГБНУ ВНИИОЗ), Волгоград;
3. ФГБУ Алтайский государственный природный биосферный заповедник, Горно-Алтайск;
4. ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» (КБНЦ РАН), Нальчик;
5. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горно-Алтайский государственный университет» (ФГБОУ ВО ГАГУ), Горно-Алтайск;
6. ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН», Оренбург;
7. ФГБУН Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук (ГБС РАН), Москва;
8. ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет», Биробиджан, Еврейская автономная область;
9. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Астраханский ордена Трудового Красного Знамени государственный природный биосферный заповедник», Астраханская область;

10. ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур» (ФГБНУ ФНЦ ЗБК), п. Стрелецкий, Орловская обл.

### **1.3.8 Научные проекты, выполняемые с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в 2023 году**

В 2023 г. возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг» использовались для решения задач 15 проектов, поддерживаемых Российским научным фондом, Российским фондом фундаментальных исследований и Министерством образования и науки:

- Тема «Углерод» № 123062200005-9, Проведение комплекса исследований по разработке технологий обработки данных дистанционного зондирования и прототипа информационно-аналитической системы для мониторинга углерода лесов и других наземных экосистем Российской Федерации, Руководитель: Барталев С.А., д-р техн. наук, 2023–2024 гг.; Головная организация — Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН;
- РФФИ № 23-27-00412, Развитие методов дистанционной оценки биофизических характеристик растительного покрова на основе российских спутниковых данных КМСС, модели переноса излучения и методов машинного обучения, Руководитель: Плотников Д.Е., канд. физ.-мат. наук, 2023–2024 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- Минобрнауки № ЭБ 075-15-2022-1229, Применение технологий высокопроизводительных вычислений и больших данных для совместной разработки экономически эффективных автоматизированных методов широкомасштабного биомониторинга водно-болотных угодий, Руководитель: Барталев С.А., д-р техн. наук, 2022–2024 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- Тема «Эмиссия», госрегистрация № 122101700045-7, Дистанционный мониторинг распределения концентраций и потоков малых газовых составляющих в атмосфере Земли, Руководитель: Ермаков Д.М., канд. физ.-мат. наук, 2022–2023 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- РФФИ № 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;
- Тема «Космос-Д» № 122042500019-6, Большие данные в космических исследованиях: астрофизика, солнечная система, геосфера, Руководитель: Прошин А.А., канд. техн. наук, 2019–2023 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- Тема «Мониторинг» № 122042500031-8, Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности, Руководитель: Лупян Е.А., д-р техн. наук, 2003–2023 гг., Головная организация — Институт космических исследований Российской академии наук;
- 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);
- РНФ № 23-76-00007, «Разработка научных методов и подходов устойчивого управления почвенными ресурсами на основе технологий дистанционного зондирования Земли (на примере юга Дальнего Востока)», Руководитель: Асеева Т.А., д-р с.-х. наук, 2023 г., Головная организация — Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН);
- РНФ № 19-71-20035-П, «Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН – Черное море» и её интеграция с программно-аппаратным комплексом ЦКП «ИКИ-Мониторинг», Руководитель: Агошков В.И., д-р физ.-мат. наук, 2023 г., Головная организация — Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН);
- РНФ № 23-74-00067, «Научные основы учета, оценки экологического состояния, климатогенной роли и пожарной опасности антропогенно измененных торфяных болот на основе спутниковых и наземных данных», Руководитель: Медведева М.А., канд. биол. наук, 2023 г., Головная организация — Институт лесоведения Российской академии наук (ИЛАН РАН);
- РНФ № 23-77-00027, «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования», Руководитель: Костяной А.Г., д-р физ.-мат. наук, 2023–2026 гг., Головная организация — Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН);
- РНФ № 23-77-00011, «Краткосрочное прогнозирование облачности и осадков по данным геостационарных спутников на территории Дальнего Востока» по мероприятию «Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня», Руководитель: Мальковский С.И., канд. техн. наук, 2023 г., Головная организация — Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН).

За предшествующие годы с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» было выполнено более 65 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 850 работ, которые выполнялись с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Из них 79 статей были опубликованы в 2023 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»***

Постоянное наращивание аппаратной инфраструктуры ЦКП «ИКИ-Мониторинг» приводит к тому, что классические подходы по организации взаимодействия между вычислительными узлами и ресурсами хранения становятся неэффективными и приводят к задержкам и отказам в обслуживании при массивных потоках обработки данных. Узкими местами в этом случае становятся каналы связи, пропускная способность точек обмена данными, то есть серверов архивации и диспетчеризации данных, причём, что оказалось несколько неожиданным, не только за счёт производительности дисковых и сетевых подсистем, но и за счёт устойчивости сетевых сервисов, то есть программных, а не аппаратных компонент. В силу этого сейчас активно ведутся работы по реорганизации сетевой инфраструктуры для создания максимально широкополосного (с каналами пропускной способностью 10 Гбит/с и более) коммутационного ядра ЦКП, в котором замкнуты основные потоки данных, а также потребительских сегментов сети ЦКП, в которой размещаются средства обмена данными с внешними пользователями (веб-сервисы и т.п.).

Не менее активно ведутся работы по реорганизации системы управления обработкой для минимизации паразитного трафика и мусорных соединений в сети, а также для повышения её управляемости и устойчивости. Также сейчас проводится децентрализация основных точек пополнения нагруженных архивов данных для снижения нагрузки на них и дублирование точек доступа к каталогам архивов для обеспечения бесперебойного доступа пользователей к высоконагруженным сервисам ЦКП.

Также необходимо отметить, что при всех темпах развития и количественном и качественном росте инфраструктуры ЦКП, в глобальном смысле он остаётся локализованным на одной, пусть и высококачественной площадке, на которой размещено подавляющее большинство ресурсов хранения, обработки и предоставления данных. В такой ситуации вопрос обеспечения устойчивости центра, неоднократно поднимавшийся ранее, остаётся крайне актуальным. Как показывает анализ ситуации, другие ЦКП, обеспечивающие работу с данными, и суперкомпьютерные центры (СКЦ) сталкиваются с аналогичными проблемами. В этой связи было бы логичным обеспечить взаимную интеграцию таких различных центров между собой путём развёртывания на их мощностях узлов ЦКП-партнёров по взаимно согласованным правилам и принципам. Подобная интеграция не только обеспечила бы повышенную отказоустойчивость всех участников этой схемы, но и позволила бы достичь более качественных результатов работы всех центров, в первую в области междисциплинарных проектов и исследований на стыке компетенций разных центров.

#### ***1.3.10.2 Возможные перспективные направления развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг»***

В свете текущей ситуации, требующей проведения интеграции различных ЦКП и СКЦ между собой для повышения их устойчивости, основным направлением развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг» становится обеспечение подобного взаимодействия с внешними ресурсами и системами. Для этого необходимо разработать общие принципы и правила проведения интеграции и использования ресурсов, особенно для существенно различающихся по структуре и задачам центров. Кроме того, крайне важным вопросом при проведении такой интеграции является обеспечение широкополосных каналов связи между удалёнными узлами, для чего, как пример, целесообразным представляется использование национальной исследовательской компьютерной сети НИКС.

Другим важным направлением работ по развитию ЦКП становится разработка средств, позволяющих пользователям работать с архивами ЦКП не только посредством веб-сервисов и информационных систем, предоставляющих строго фиксированный набор инструментов для обработки и анализа, но и с помощью своих инструментов. Этого возможно достичь двумя способами: разработкой модулей онлайн-доступа к архивам ЦКП для современных настольных ГИС (как, например, QGIS или «Панорама») или же развитием интерактивных сред работы с данными ЦКП наподобие Google Earth Engine. Оба подхода представляют собой большой интерес и обладают своими преимуществами. На данный момент ведутся работы по оценке их реализуемости для ЦКП.

Кроме того, постоянным направлением развития ЦКП «ИКИ-Мониторинг» остаётся совершенствование программной инфраструктуры основных компонент ЦКП, то есть оптимизация методов и алгоритмов обработки данных, улучшение и расширение инструментария доступа к данным и их анализа, а также внедрение современных методик хранения и предоставления данных на базе облачных и объектных хранилищ, построенных на базе сравнительно недорогих серверов, а не больших СХД.

## **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, в том числе автоматизированной обработки спутниковых данных
- Создание и развитие информационных систем, для исследования различных процессов и явлений, и использования данных ДЗЗ для их моделирования
- Поддержка (включая формирование и ведение сверхбольших архивов спутниковых данных и результатов их обработки) и развитие ЦКП ИКИ-Мониторинг для решения задач изучения и мониторинга различных процессов и явлений, в том числе решения междисциплинарных задач

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Технологии» в 2023 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 с целью 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 устойчивого развития.

Подробно полученные в данном направлении результаты изложены в следующих научных публикациях [29, 31, 34, 80, 86, 123, 124, 128–130, 134].

### **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 Исследование возможностей картографирования наземных экосистем России на основе данных прибора VIIRS***

Карта типов наземных экосистем является одним из ключевых информационных продуктов, необходимых для мониторинга растительного покрова на основе спутниковых данных ДЗЗ. Такого рода карты дают возможность оценки многолетних изменений

растительных экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов, включая деструктивные нарушения в лесных экосистемах, процессы их возобновления и сукцессионной динамики. Работы по спутниковому картографированию наземных экосистем ведутся в ИКИ РАН на протяжении ряда лет (Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.; Егоров В.А., Барталев С.А., Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 282–286). Выполненные ранее работы позволили получить временные ряды карт растительности начиная с 2001 г., а также разработать методы их ежегодной актуализации. В настоящее время регулярное картографирование наземных экосистем выполняется на основе разносезонных данных радиометра MODIS, установленного на спутниках TERRA и AQUA. В связи с ограниченным сроком службы спутниковых приборов, при планировании долгосрочного и регулярного мониторинга растительности возникает задача переноса разработанных методов и технологий для их применения к новым спутниковым данным. Были выполнены исследования возможности использования данных радиометра VIIRS для картографирования наземных экосистем России. Данный прибор может рассматриваться в качестве приёмника аппарата MODIS и имеет схожие характеристики, в частности, обеспечивая получение данных в наиболее информативных для изучения растительности спектральных каналах (таблица 2.1.1.1). Схожее пространственное разрешение и высокая периодичность съемки потенциально позволяют применять разработанные ранее методы для решения широкого круга задач мониторинга растительности на территории России.

Таблица 2.1.1.1 — Спектральные каналы приборов MODIS и VIIRS, используемые для классификации растительного покрова

Спектральный диапазон	VIIRS			MODIS		
	Канал	Диапазон, мкм	Разрешение, м	Канал	Диапазон, мкм	Разрешение, м
Красный	I1	0,600–0,680	375	1	0,620–0,670	250
Ближний ИК	I2	0,846–0,885	375	2	0,841–0,876	250
Средний ИК	I3	1,580–1,640	375	6	1,628–1,652	500

Разработанные в ИКИ РАН алгоритмы предварительной обработки высоко периодичных данных ДЗЗ среднего пространственного разрешения были использованы для построения ежедневных, очищенных от влияния облачности изображений по данным VIIRS. Для дальнейшей классификации были использованы сезонные срезы и композитные изображения, полученные в различные периоды вегетации 2021 г., а именно:

- весенний период (135-й день года);
- летний период (195-й день года);
- осенний период (255-й день года);
- зимний период с наличием снежного покрова (декабрь – апрель).

Использование данных, полученных в разные временные промежутки, позволяет распознавать классы растительности, имеющие разные спектрально-временные сигнатуры, обусловленные особенностями фенологического развития. Использование зимнего изображения с наличием снежного покрова на земной поверхности позволяет лучше отделять классы покрытых лесом территорий. На рисунке 2.1.1.1 представлены полученные по данным VIIRS разносезонные спутниковые изображения территории России.

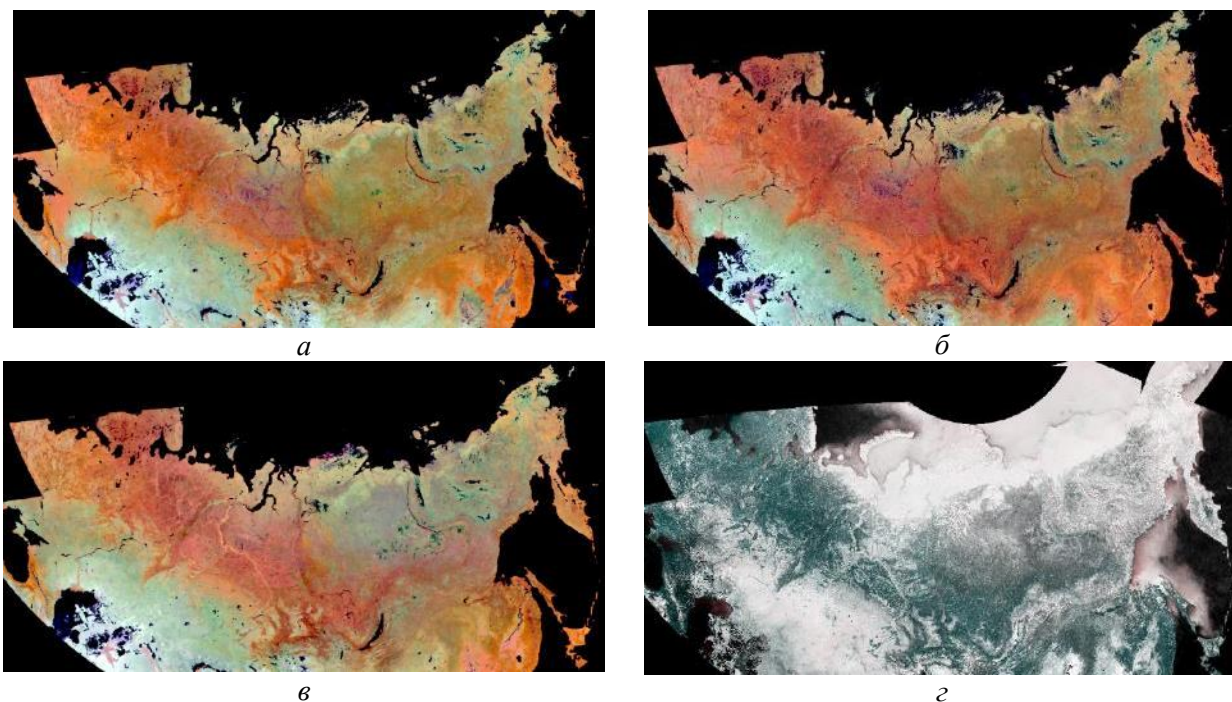


Рисунок 2.1.1.1 — Спутниковые изображения, полученные по данным VIIRS на территорию России за 2021 год: *а* — весеннее изображение (RGB = NIR; SWIR; Red); *б* — летнее изображение (RGB = NIR; SWIR; Red); *в* — осеннее изображение (RGB = NIR; SWIR; Red); *г* — зимнее изображение (RGB = Red; Red; NIR)



Рисунок 2.1.1.2 — Карта наземных экосистем России по данным VIIRS 2021 года

На основе полученных разносезонных изображений была выполнена классификация наземных экосистем России. Классификация выполнялась методом



максимального правдоподобия с применением локально-адаптивного алгоритма LAGMA (Bartalev S., Egorov V., Loupian E., Khvostikov S. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5. No. 1. P. 55–64). Данный подход подразумевает разбиение всей территории на регулярную сеть ячеек с проведением отдельной классификации в рамках каждой из них и позволяет учитывать изменчивость значений признаков распознавания различных классов на больших территориях. В качестве опорной выборки для обучения классификатора были использованы эталоны, полученные по данным MODIS с применением динамической актуализации выборки. Тематическое содержание полученной по результатам классификации карты включает 25 основных классов наземных экосистем, в том числе 9 классов занятых лесом территорий. Полученная карта наземных экосистем России за 2021 г. представлена на рисунке 2.1.1.2.

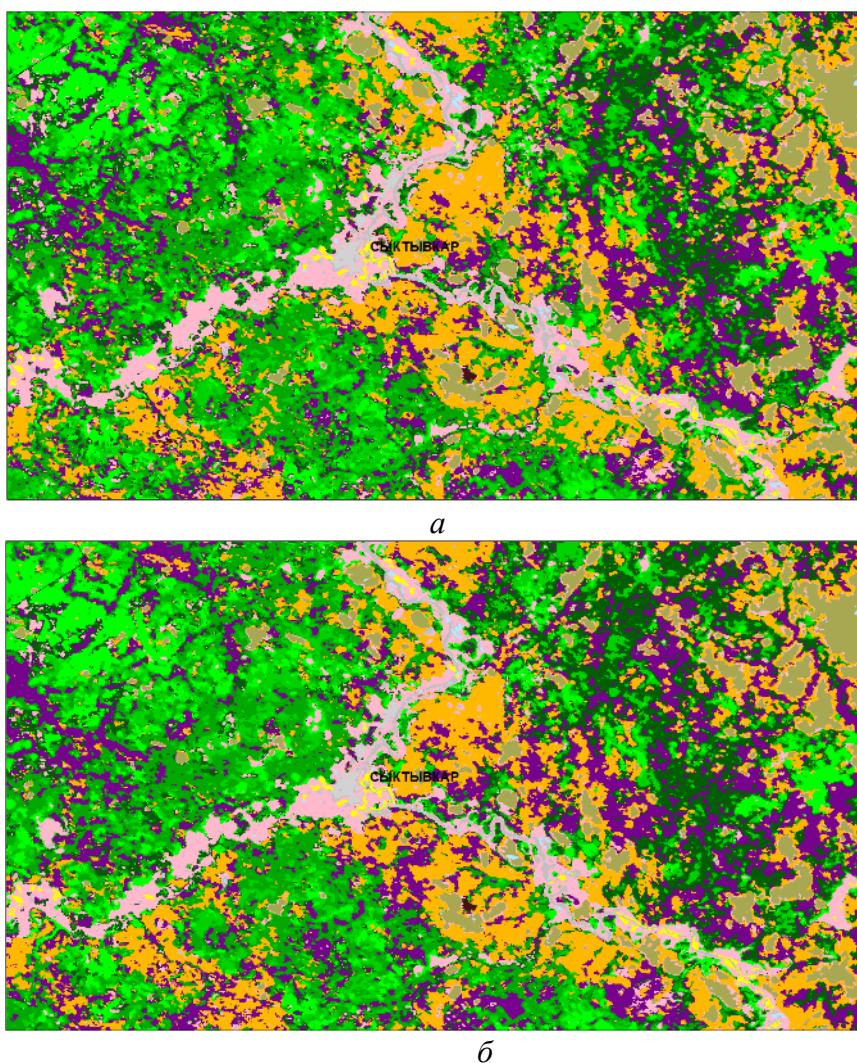


Рисунок 2.1.1.3 — Фрагменты карт наземных экосистем, полученных по данным:  
а — MODIS; б — VIIRS за 2021 г.

Было выполнено сравнение полученной карты с картой 2021 г., сформированной в рамках регулярного картографирования наземных экосистем на основе данных MODIS. В целом высокий уровень схожести полученных карт (рисунок 2.1.1.3), свидетельствует о принципиальной возможности переноса методов картографирования наземных экосистем на данные прибора VIIRS.

Оценка покрытой лесом площади, полученная по данным MODIS и VIIRS составила 774 и 762 млн га соответственно, расхождение составило 1,5 %. Сумма ошибок первого и второго рода для обобщенного класса покрытой лесом площади составила

около 12%. Матрица перепутывания основных классов наземных экосистем представлена в таблице 2.1.1.2. По отдельным классам растительности расхождение лежит в диапазоне от 10 до 20 %. Дальнейшие исследования будут направлены на анализ причин полученных расхождений и возможностей их коррекции, а также на возможность развития методов предварительной обработки и использования улучшенных композитных изображений, полученных в разные фенологические периоды.

Таблица 2.1.1.2 — Матрица перепутывания основных классов растительного покрова, полученных на основе данных VIIRS и MODIS, %

		MODIS										
		Темнохвойный лес	Светлохвойный лес	Лиственный лес	Лиственничный лес	Кустарники	Болога	Луга	Смешанный лес	Открытые грунты	Тундра	Редины
VIIRS	Темнохвойный лес	<b>81</b>	8	0	2	0	1	0	7	0	0	0
	Светлохвойный лес	7	<b>74</b>	4	3	0	4	1	6	0	0	1
	Лиственный лес	2	5	<b>83</b>	5	2	1	8	1	0	0	2
	Лиственничный лес	3	5	4	<b>80</b>	8	1	1	1	0	0	11
	Кустарники	0	0	0	0	<b>74</b>	1	0	0	0	1	2
	Болога	0	1	0	0	2	<b>85</b>	1	0	1	1	2
	Луга	0	1	3	0	0	2	<b>86</b>	0	2	0	1
	Смешанный лес	5	5	4	2	0	0	0	<b>85</b>	0	0	0
	Открытые грунты	0	0	0	0	1	1	1	0	<b>87</b>	7	1
	Тундра	0	0	0	0	3	1	0	0	2	<b>89</b>	1
	Редины	1	1	1	6	9	4	2	0	7	2	<b>79</b>
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

### *2.1.2 Исследование возможностей дистанционной оценки сезонных и многолетних изменений площадей подвижных песков и дефлированных территорий для решения задач мониторинга опустынивания*

В последние годы на юге России отмечена интенсификация процессов деградации растительного и почвенного покрова пастбищных ландшафтов вплоть до их полного опустынивания — превращения в открытые пески, деструктивные области (котловины выдувания) дефляции и другие полностью лишенные растительного покрова земли. Климатические изменения, направленные на усиление аридизации, неконтролируемый выпас домашнего скота, нерациональная распашка способствуют усилению процессов дефляции и водной эрозии. Мониторинг процессов деградации и своевременное принятие решений о регулировании антропогенных нагрузок, проведение фитомелиоративных мероприятий позволяют существенно снизить интенсивность процессов деградации и восстановить растительный покров, что уже было достигнуто на территории Чёрных земель в Калмыкии и отдельных участков пастбищ в Терско-Кумском междуречье. Высокая скорость и разнонаправленность как сезонных, так и многолетних изменений площадей дефлированных территорий требует разработки методов обработки временных рядов для определения стабильных, растущих и восстанавливающихся очагов

опустынивания. Большая часть существующих исследований процессов опустынивания по данным ДЗЗ высокого пространственного разрешения не учитывает их сезонную динамику, при этом основывается либо на периоде максимума вегетации весной или в начале лета, либо не приводит сведений о датах использованных спутниковых изображений.

Целью исследований в отчетный период являлась разработка метода мониторинга сезонных изменений площадей подвижных песков и дефлированных территорий по данным ДЗЗ высокого пространственного разрешения с устраненным влиянием облачного покрова. Картографирование открытых песков и котловин выдувания осуществлялось на основе классификации с обучением ежемесячных композитных изображений Sentinel-2 в системе «Вега-Science» (рисунок 2.1.2.1). Опорные данные для классификации формировались на основе экспертного дешифрирования спутниковых изображений, а также по результатам экспедиционных работ, проведенных в 2021–2023 гг. Наличие ежемесячных спутниковых данных ДЗЗ за март–ноябрь каждого года позволяет выполнить анализ не только многолетних, но и сезонных изменений в площади опустынивания, что ранее на юге европейской России выполнялось только по данным среднего или низкого пространственного разрешения.

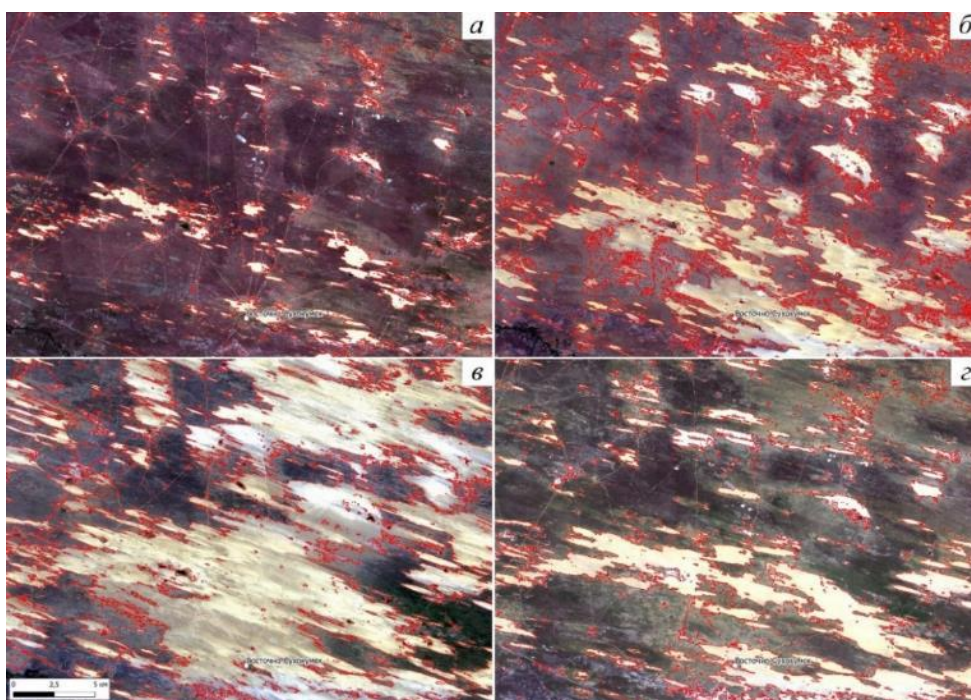


Рисунок 2.1.2.1 — Примеры картографирования открытых песков и дефлированных территорий севернее пос. Восточно-Сухокумск Республики Дагестан: *а* — май 2019 г.; *б* — май 2020 г.; *в* — октябрь 2020 г.; *г* — апрель 2021 г. Красный контур — результат классификации открытых песков и дефлированных площадей)

Кроме расчета площадей открытых песков и котловин выдувания на разные периоды, были определены и разности между ними, что дало возможность выявить приращения (новые площади, которые есть в текущем месяце/году, но отсутствовали в предыдущем), восстановление площадей (площади, отмеченные в предыдущем месяце/году, но отсутствующие в текущем), а также «переходящие» участки — пересечение между двумя периодами, общее для обоих. Также определялись максимальные и минимальные площади дефлированных территорий для каждого года: в первом случае сумма всех пикселей, которые относились к классу опустынивания не менее чем в одном месяце, во втором — только те пиксели класса опустынивания, которые сохранялись в этом состоянии на протяжении всех месяцев года. Поскольку изменение площадей открытых песков и дефлированных территорий состоит из



непрерывных процессов образования новых и зарастания существующих, то анализ изменений площадей новых и восстановившихся очагов опустынивания позволяет более точно проанализировать факторы соответствующих процессов.

Высокая динамичность очагов открытых песков, связанная с эоловым переносом, распределением пастбищных нагрузок, гидротермическими условиями для вегетации растительности, способной закреплять пески, требует учитывать сезонные изменения площадей лишенных растительного покрова пастбищ при анализе их многолетних изменений. Одними из вариантов ежегодной характеристики площадей открытых песков и дефлированных территорий могут быть максимальные и минимальные годовые площади, включающие участки, которые были отнесены к данной категории хотя бы на одну дату в течение года, либо на протяжении всего года соответственно (рисунки 2.1.2.2, 2.1.2.3).

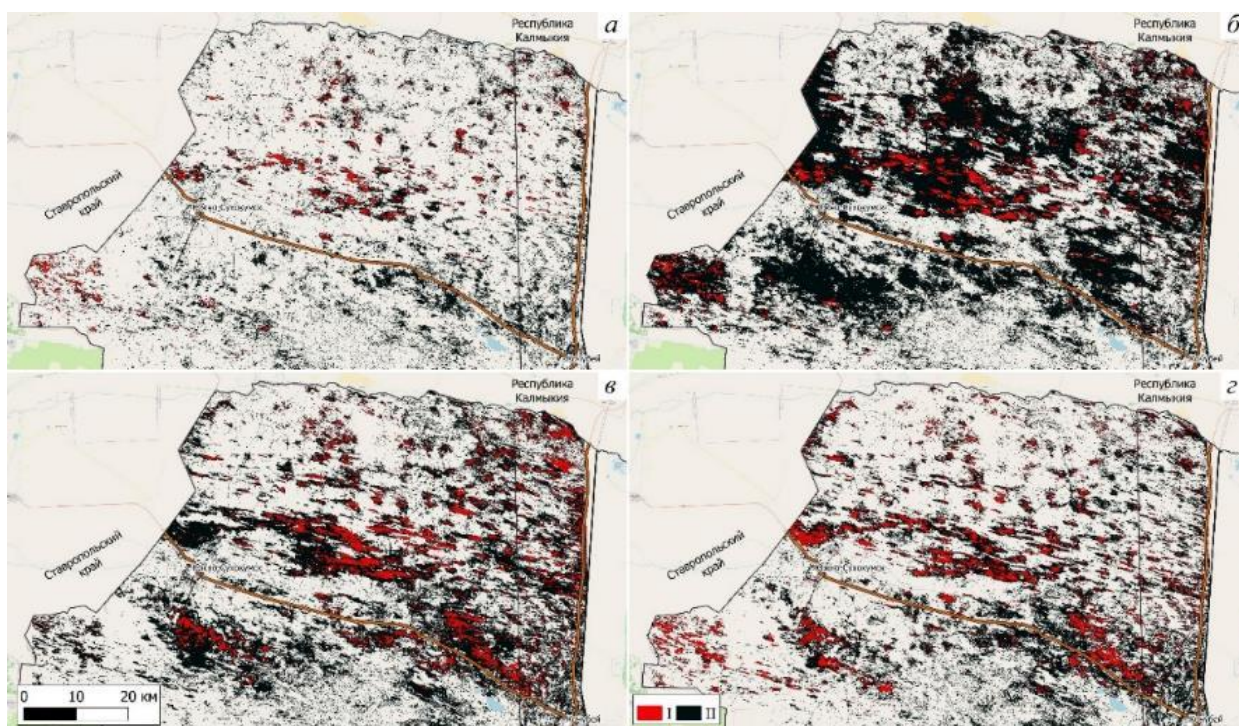


Рисунок 2.1.2.2 — Примеры определения минимальных (I) и максимальных (II) площадей открытых песков и дефлированных территорий в 2019–2020 гг. на севере Республики Дагестан

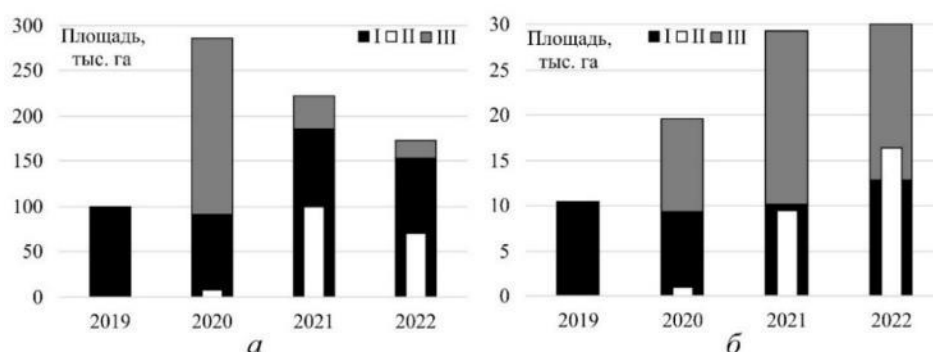


Рисунок 2.1.2.3 — Пример определения площадей открытых песков и дефлированных территорий на севере Республики Дагестан: а — максимальная площадь за год; б — минимальная площадь за год (I — переходящая площадь опустынивания, II — восстановление очагов опустынивания, III — новая площадь опустынивания)

Глубина архива данных Sentinel-2 ограничена 2015 г., а спутниковые изображения этой системы второго уровня обработки поставляются только с 2019 г. Соответственно наличие композитных изображений с устраненным влиянием облачности также

ограничено 2019 г. В то же время для понимания процессов динамики состояния экосистем требуется их долговременный мониторинг. Миссия Landsat, несмотря на значительную продолжительность функционирования, не обеспечивает в полной мере сезонный охват, необходимый для мониторинга площадей открытых песков и дефлированных территорий, т.к. значительную часть времени функционировал только один аппарат Landsat-5 TM, а данные Landsat-7 ETM+ имеют артефакты. Только запуск КА Landsat-9 в 2022 г. позволил существенно увеличить временное разрешение данных Landsat. Таким образом, ни данные Sentinel-2, ни данные Landsat не позволяют получить необходимый долговременный ряд данных, учитывающий сезонные изменения площадей дефляции. Одним из решений проблемы недостаточной продолжительности рядов данных с отдельных спутниковых систем является использование мультисенсорных данных, в том числе калибровка изображений более низкого пространственного разрешения на подпиксельном уровне по изображениям более высокого разрешения.

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

### ***2.2.1 Развитие подходов к картографированию структурных характеристик пастбищной растительности с применением временных рядов спутниковых данных Sentinel-2 и MODIS***

Пастбища являются очень важным типом экосистем, обеспечивающим отгонное скотоводство, а также сохранение биоразнообразия при соблюдении норм выпаса. Мониторинг состояния пастбищ и своевременное регулирования поголовья скота в зависимости от их емкости позволяют избежать деградации растительности. При этом фитомасса степной и пустынной растительностью отличается значительной сезонной и межгодовой изменчивостью. Технологии обработки спутниковых данных позволяют проводить широкомасштабный мониторинг значительно эффективнее и быстрее традиционных наземных обследований, что крайне важно в условиях продолжающихся процессов опустынивания на юге России. Наиболее широко в исследованиях пастбищ используются данные дистанционного зондирования, получаемые спутниковыми системами MODIS, Landsat-8/9 OLI, Sentinel-2 MSI. Высокое пространственное разрешение спутниковых изображений Sentinel-2 и Landsat дает возможность учесть существенную пространственную неоднородность растительного покрова пастбищ в засушливых условиях, но преимуществом данных MODIS является более высокое временное разрешение, что также важно, поскольку растительность аридных ландшафтов отличается значительной сезонной динамичностью. Наличие ежедневных данных MODIS с устраненным влиянием облачности позволяет сопоставить спектрально-отражательные характеристики и наземные данные непосредственно в день их получения. Спутниковые изображения Sentinel-2 по сравнению с Landsat имеют не только более высокое пространственное, но и временное разрешение, поэтому их использование более предпочтительно. В ходе исследования проводилось сопоставление данных наземных измерений пастбищной растительности российской части Северного Прикаспия и спутниковых данных Sentinel-2 (ежемесячные композитные изображения) и MODIS (ежедневные композитные изображения непосредственно на даты проведенных полевых измерений).

Сила корреляционной связи фитомассы в воздушно-сухом состоянии и NDVI значительно слабее по сравнению с сырой, но статистически значима ( $R = 0,55$ ,  $p < 0,001$ ). У однолетних и эфемероидных фитоценозов отсутствует связь фитомассы и КСЯ в голубом, зеленом, ближнем инфракрасном (БИК) диапазонах и EVI. Также нет связи проективного покрытия и КСЯ в БИК-диапазоне, при том, что с NDVI корреляция высокая. Для однолетних и эфемероидных растительных сообществ характерны



более низкие значения NDVI и относительно высокие КСЯ во всех диапазонах по сравнению со злаками и полукустарничками при равном проективном покрытии (рисунок 2.2.1.1).

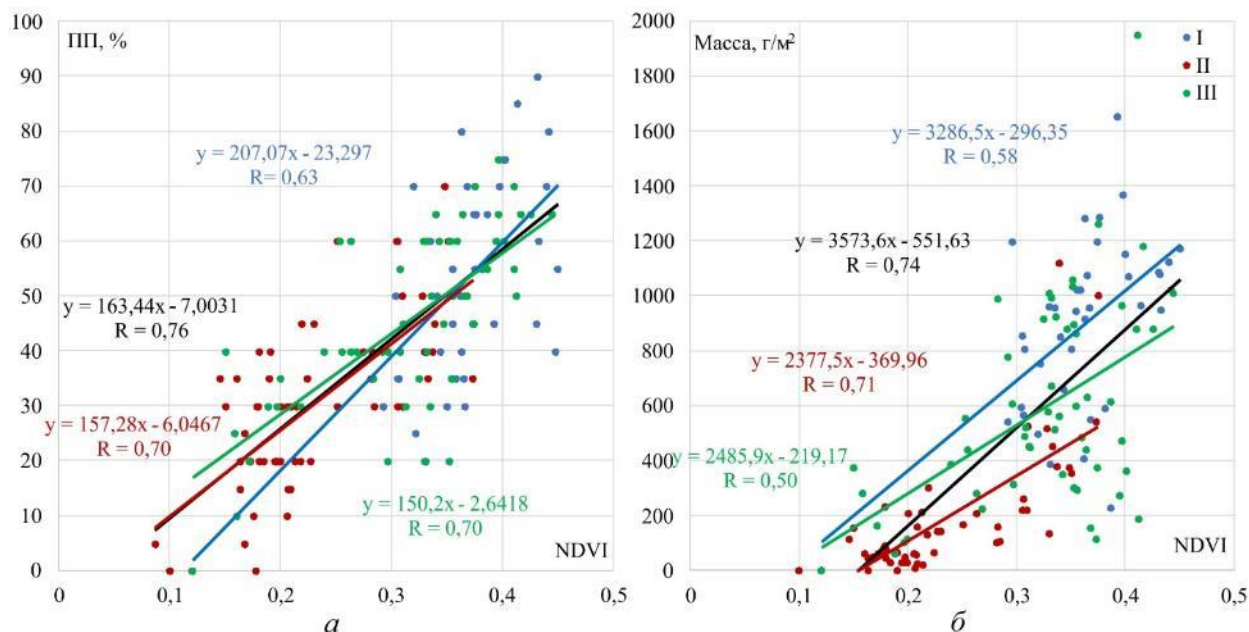


Рисунок 2.2.1.1 — Связь проективного покрытия (а) и фитомассы (б) с NDVI по данным Sentinel-2 для различных типов растительных сообществ (I — многолетние злаки, II — однолетники и эфемероиды, III — полукустарнички)

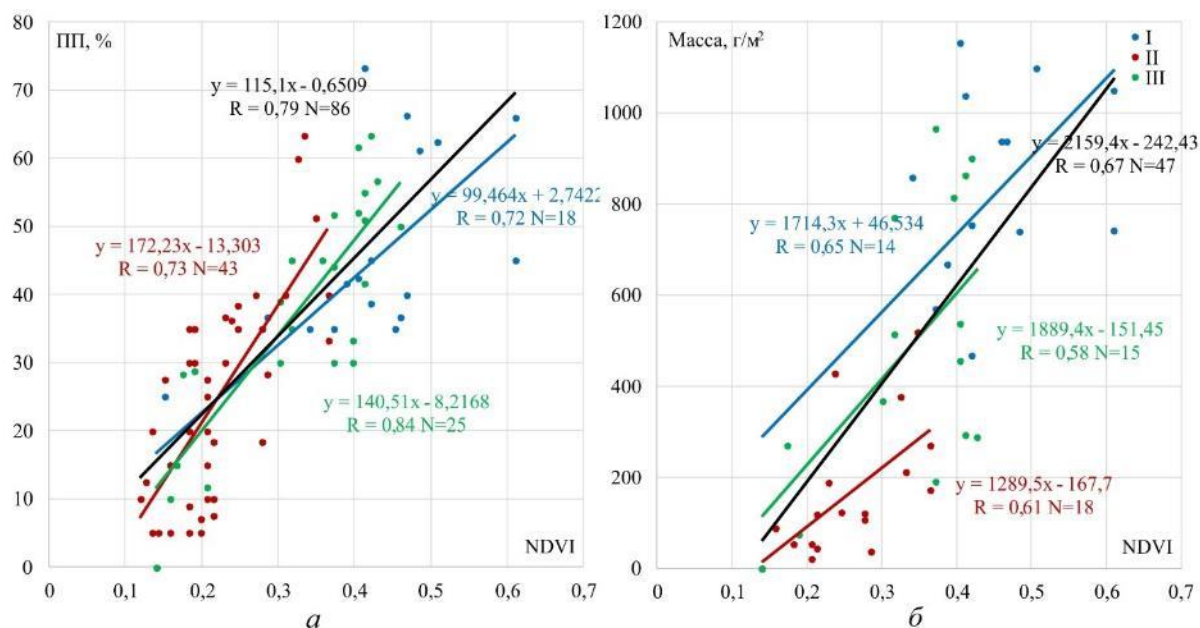


Рисунок 2.2.1.2 — Связь проективного покрытия (а) и фитомассы (б) с NDVI по данным MODIS для различных типов растительных сообществ (I — многолетние злаки, II — однолетники и эфемероиды, III — полукустарнички)

Использование ежедневных данных MODIS с устраненным влиянием облачности дало возможность получить значения NDVI непосредственно на дни проведения наземных исследований (рисунок 2.2.1.2). Это позволило повысить силу корреляционной связи проективного покрытия и NDVI на уровне выделенных групп растительного покрова, но в случае с фитомассой существенной разницы по сравнению с использованием данных Sentinel-2 не выявлено. Это может быть связано со значительной неоднородностью растительного покрова в границах пикселей MODIS, что усугубляется

из-за значительной межгодовой и сезонной изменчивости растительности. При анализе по отдельным годам исследований сила связи NDVI и проективного покрытия по данным MODIS практически не меняется по сравнению с Sentinel-2, но существенно растет в случае с фитомассой однолетников и полукустарничков, доминировавших на геоботанических площадках в 2021 и 2022 гг.

В исследовании была предпринята попытка использовать алгоритм Random forest для построения модели регрессии структурных и спектрально-отражательных характеристик по данным Sentinel-2, что позволило несколько повысить точность по сравнению с линейной регрессией для фитомассы ( $R^2 = 0,62$ ), но не для проективного покрытия ( $R^2 = 0,45$ ). Добавление данных о суммах осадков за предшествующий наземным исследованиям период, коэффициентов обратного рассеяния поляризации VV (вертикально-вертикальная) и VH (вертикально-горизонтальная) по данным Sentinel-1, их отношения и нормализованной разницы в качестве признаков не дало увеличения точности ни по одному из показателей. Наибольший вес при определении проективного покрытия методом Random forest имеют значения NDVI и КСЯ в голубом и красном каналах. Для определения фитомассы наиболее важны NDVI и КСЯ красного диапазона. При этом ВИ PVI и SAVI, которые считаются более подходящими для картографирования разреженной растительности в условиях значительного влияния отражения почвенного покрова, не дают значительной прибавки точности и имеют слабый вес.

В результате проведенных исследований установлено, что видовые различия растительности играют менее значимую роль по сравнению с ее структурными характеристиками. Межгодовые и внутрисезонные изменения проективного покрытия и особенно фитомассы влияют на спектрально-отражательные характеристики сильнее, чем видовые особенности растений. Использование ежедневных данных MODIS, полученных непосредственно на даты проведения наземных измерений, позволило получить более сильную связь фитомассы и спектрально-отражательных характеристик по сравнению с Sentinel-2, которые могли быть получены через 1–12 дней. Несмотря на значительно более низкое пространственное разрешение спутниковых изображений MODIS по сравнению с Sentinel-2, в условиях значительной неоднородности растительного покрова более высокое временное разрешение является крайне важным при определении фитомассы. Также зависимость результатов от многолетних и сезонных изменений состояния растительного покрова под влиянием природных и антропогенных факторов требует регулярного обновления опорных наземных данных.

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

### ***2.3.1 Разработка подходов к оценке чистой первичной продукции растительного покрова наземных экосистем России с использованием спутниковых данных ДЗЗ***

Оценка баланса углерода растительного покрова наземных экосистем России является фундаментальной задачей, имеющей множество экологических и экономических приложений. На данный момент получили развитие два основных подхода к оценке баланса углерода в растительном покрове наземных экосистем, а именно:

- 1) оценка баланса углерода на основе определения изменений в различные моменты времени его пулов (резервуаров), включающих листовую и древесную биомассу, живой и мертвый почвенный покров, корневую систему и др.;
- 2) оценка баланса углерода на основе измерения его потоков между наземными экосистемами и другими компонентами окружающей среды, включая атмосферу и гидросферу.

Каждый из вышеуказанных подходов предполагает использование различных доступных инструментов для решения задачи, включая наземные измерения пулов углерода и потоков парниковых газов, технологии дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и моделирование. В частности, в исследованиях по первому направлению используются данные наземных и дистанционных измерений характеристик растительного покрова, включая объём стволовой древесины и породный состав лесов, параметрические модели зависимости запасов углерода в лесах от его возраста, бонитета, относительной полноты и некоторых других параметров. Исследования по второму направлению представлены наземными измерениями потоков углерода на вышках сети тестовых участков (например, FLUXNET). При этом, использование данных ДЗЗ (в частности, временных рядов биофизических характеристик LAI и FPAR), метеорологической информации (температура и осадки) и моделей позволяет проводить расчеты значений таких показателей, как валовая и чистая первичная продукция (GPP и NPP).

В ИКИ РАН к настоящему времени существенное развитие получили исследования и разработки с использованием подхода к оценке баланса углерода лесных экосистем на основе определения изменений его пулов в различные моменты времени. Дальнейшее развитие методов оценки бюджета углерода наземных экосистем может быть сопряжено с возможным комплексным использованием обоих существующих методических подходов с учетом уже разработанных технологий дистанционного мониторинга характеристик растительного покрова. В основу технологии расчёта GPP/NPP может быть положен алгоритм MOD17, разработанный в Университете Монтаны (штат Монтана, США) в рамках исследований NASA по созданию глобальных продуктов биофизических параметров растительного покрова на основе временных рядов данных наблюдений инструментами MODIS и VIIRS ([https://lpdaac.usgs.gov/documents/926/MOD15\\_User\\_Guide\\_V61.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/926/MOD15_User_Guide_V61.pdf)). Разработка указанного алгоритма ведется с конца 1990-х годов и на данный момент накоплена обширная база наземных измерений, на основе которых проводится калибровка и валидация продукта на глобальном уровне (Endsley K.A., Zhao M., Kimball J.S., Devadiga S. Continuity of global MODIS terrestrial primary productivity estimates in the VIIRS era using model-data fusion // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2023. V. 128(9). <https://doi.org/10.1029/2023JG007457>; Madani N., J Kimball S., Running S.W. Improving global gross primary productivity estimates by computing optimum light use efficiencies using flux tower data // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2017. V. 122(11). P. 2939–2951). Однако данный продукт не был оптимизирован для территории России, и кроме того в ИКИ РАН выполнен ряд разработок, которые потенциально способны улучшить точность данной методики за счет использования дополнительных данных, включая информацию об типах наземных экосистем, объёме стволовой древесины, проективном покрытии растительного покрова, флуоресценции хлорофилла и т.п.

Алгоритм MOD17 основан на теории J.L. Monteith (*Monteith J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems // J. Applied Ecology. 1972. V. 9(3). P. 747–766*), согласно которой, при отсутствии ограничений внешней среды (влаги и качества почвы), валовая первичная продукция GPP растительного покрова линейно растёт пропорционально количеству поглощенной солнечной энергии. Ключевое преимущество данного эмпирического подхода в том, что он сформулирован универсально для всех типов и фракций растительного покрова в целом, и не использует сложные модели баланса углерода для отдельных его пулов. Доля солнечной энергии поглощенной растительным покровом (APAR) является интегральной характеристикой, которая включает в себя как учет метеорологических условий (ослабление солнечной энергии за счет рассеяния в атмосфере и облачного покрытия), так и характеристики самого растительного покрова (коэффициент поглощения солнечной энергии при данной плотности листвы, характеризующейся индексом листовой поверхности, LAI). Конверсионный коэффициент

эффективности использования солнечной энергии  $\epsilon$  (Light Use Efficiency, LUE) переводит энергию APAR в рост биомассы GPP. Данный коэффициент ослабляет максимально возможное поглощение за счет ограничивающих факторов (температура и влага). GPP дает изначальную оценку суточного поглощения углерода в ходе фотосинтеза, в то время как  $PSN_{net}$  учитывает потерю углерода в результате дыхания листвы и корней. NPP рассчитывается как годовая сумма суточного  $PSN_{net}$  за вычетом потерь на дыхание и поддержание роста. Данное описание формализовано в виде блок-схемы алгоритма, представленной на рисунке 2.3.1.1.



Рисунок 2.3.1.1 — Схема расчёта валовой и чистой первичной продукции (GPP/NPP) на основе алгоритма MOD17. Алгоритм включает три этапа: (1) расчёт валовой первичной продукции (GPP), (2) расчёт затрат на дыхание и поддержание роста (MR), которые этапе (3) суммируются для оценки чистой первичной продукции (NPP)

Практическая реализация данного алгоритма с помощью технологий ДЗЗ учитывает следующие положения. Как правило алгоритмы ДЗЗ разделяют интегральный параметр APAR на атмосферную составляющую PAR (входящий поток солнечной энергии, ослабленный за счет рассеяния в атмосфере и облаков) и FPAR (коэффициент поглощения энергии растительным покровом). Продукт PAR рассчитывается на основе ассимиляции спутниковых данных и наземных измерений в моделях климата (например, продукт NASA MERRA2) на глобальном уровне, с высоким временным (ежечасно) и низким пространственным ( $0.5^\circ$ ) разрешением. FPAR рассчитывается на основе оптических данных ДЗЗ с использованием уравнения переноса излучения (например, продукт LAI/FPAR). Объединяя оба источника данных, получаем оценку

$$APAR = PAR \cdot FPAR.$$

Коэффициент эффективности использования PAR ( $\epsilon$ ) рассчитывается на основе моделей экосистем, таких как BIOME-BGC (White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls // Earth Interactions. 2000. V. 4(3). P. 1–85). При этом

для моделирования необходимо учитывать несколько ключевых факторов. Во-первых, коэффициент  $\epsilon$  зависит от типа растительного покрова. В частности, он наиболее высок для трав и сельскохозяйственных растений (2 гС/МД), но значительно ниже для пород деревьев (0,2–1,5 гС/МД) за счет потерь углерода на дыхание древесной составляющей. Второй источник вариабельности коэффициента  $\epsilon$  это влияние метеорологических ограничивающих факторов — в частности, неоптимальная для роста температура и влажность воздуха. Установлено, например, что вечнозеленые хвойные породы леса при температуре ниже 0° С поглощают солнечную энергию, но не участвуют в процессах фотосинтеза (устьицы закрыты) (Waring R.H., Running S.W. Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales. 3<sup>rd</sup> ed. Burlington, MA, USA: Elsevier; Burlington, MA, USA: Academic Press, 2010. 440 p.). Также установлено, что при большом дефиците давления водяного пара (>2000 Па) устьицы также закрыты у многих типов растений. Зависимость коэффициента  $\epsilon$  от типа растительного покрова и метеорологических параметров рассчитывается на основе модели и хранится в виде опорных таблиц. Эту зависимость можно скорректировать на основе наземных измерений потоков углерода и метеорологических параметров на вышках (FLUXNET). Таким образом,

$$GPP = \epsilon \cdot APAR.$$

Потери углерода на дыхание и рост растений рассчитываются на основе моделирования, а также (полу)-эмпирических соотношений. В частности, рассчитывают массу листвы и древесины и по ним оценивают суточное дыхание поддержания ( $R_m$ ). Дыхание роста ( $R_g$ ) оценивают на годовом интервале как 25 % потерь NPP. В итоге имеет место следующее уравнение баланса

$$NPP = GPP - R_m - R_g.$$

На рисунке 2.3.1.2 приведен пример годового NPP на основе продукта MOD17. Два основных пика на гистограмме соответствуют широтному разделению растительности с низкой чистой первичной продукцией на севере и высокой на юге территории России.

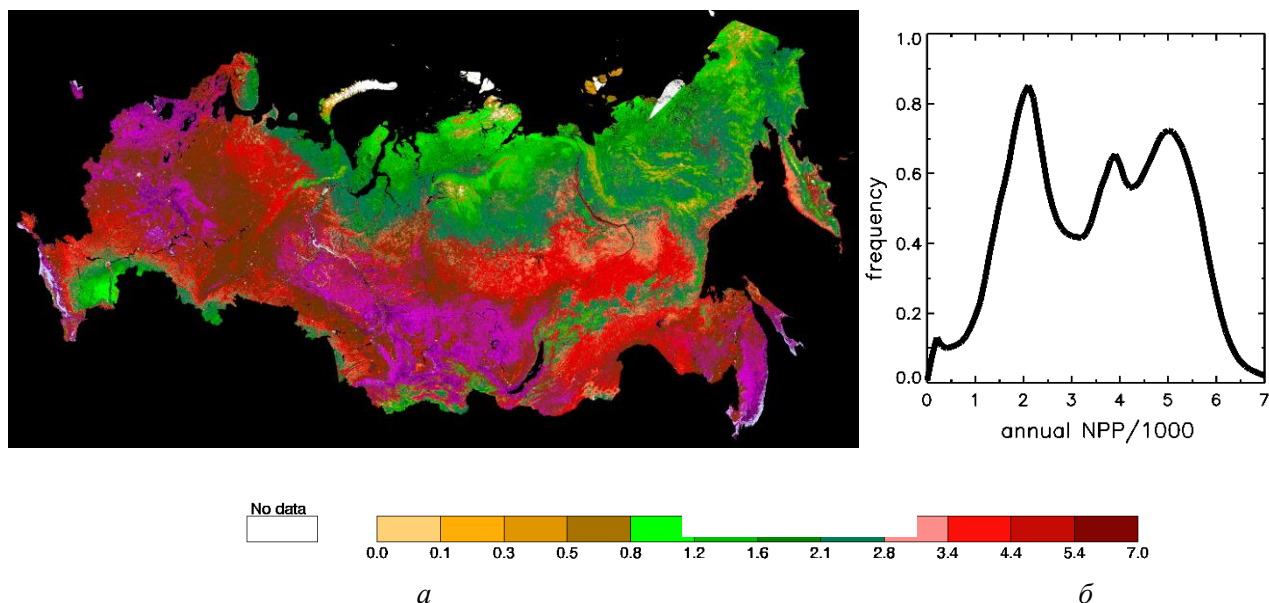


Рисунок 2.3.1.2 — Годовая чистая первичная продукция (NPP) на основе продукта MOD17 по территории России за 2020 г.: *a* — пространственное распределение значений NPP; *б* — гистограмма распределения значений NPP

На данный момент ведется разработка программного кода для интеграции алгоритма MOD17 в функционирующую в ИКИ РАН систему обработки данных ДЗЗ. Оригинальный код алгоритма получен из открытого источника (<https://github.com/arthur-e/MOD17>). Входными данными для работы алгоритма будут служить временные ряды (а) суточного интерполированного продукта LAI/FPAR пространственного разрешения



230 м, (б) ежегодной карты типов наземных экосистем пространственного разрешения 230 м, (в) метеорологических параметров (температура и влажность), рассчитанных на основе климатологического продукта NASA MERRA2 пространственного разрешения 0,5°.

По сравнению с оригинальным продуктом MOD17 (NASA GPP/NPP), разрабатываемый продукт будет иметь более высокое пространственное и ежедневное временное разрешение. Оценка GPP/NPP будет выполняться с использованием оптимизированного для территории России алгоритма LAI/FPAR (*Shabanov N.V., Egorov V.A., Miklashevich T.S. et al. Utility of Leaf Area Index for Monitoring Phenology of Russian Forests // Remote Sensing. 2023. V. 15(22). Article. 5419. <https://doi.org/10.3390/rs15225419>*). Перспективы дальнейшей оптимизации алгоритма MOD17 для территории России будут включать в себя следующие направления использования:

- 1) результатов дистанционной оценки объёма стволовой древесины (GSV) для оценки дыхания поддержания древесной составляющей баланса углерода
- 2) продукта флуоресценция растительного покрова (SIF) для настройки параметров алгоритма
- 3) временных рядов данных наземных измерений GPP/NPP и метеорологических параметров для настройки параметров алгоритма. Особое внимание при этом необходимо уделить параметризации выражения для оценки затрат на дыхание роста.

### ***2.3.2 Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных информационных продуктов, полученных по спутниковым данным ДЗЗ***

Оценка эмиссии климатически активных веществ и углерода от природных пожаров является одной из задач при оценке выбросов парниковых газов и аэрозолей в национальном и глобальном масштабе или оценке бюджета углерода растительных сообществ. Наибольший интерес в случае России представляет оценка бюджета углерода лесов, однако частые ландшафтные пожары вне лесной зоны, приводящие к значительным эмиссиям, также требуют рассмотрения.

В отчетный период был выполнен обзор существующих глобальных продуктов ДЗЗ, разработанных для оценки эмиссии климатически активных веществ в результате природных пожаров. При этом был проведен анализ вызванной природными пожарами эмиссии углерода на территории России. Были использованы данные следующих глобальных продуктов: GFAS v1.2, GICC, FINN v2.5, FEER v1.0-GFAS1.2 (или FEER v1.0-G1.2), QFED v.2.5r1 и GFED v4.1s. Характеристики рассмотренных продуктов представлены в таблице 2.3.2.1.

Расчёт эмиссий в рассмотренных продуктах основывается на оценке доли сгоревшей биомассы и коэффициенте эмиссии конкретного компонента, согласно формуле Seiler-Crutzen:

$$M_S = ABf_S\beta,$$

где  $M_S$  — масса эмиссии компонента  $S$ ;  $A$  — площадь пожара;  $B$  — плотность распределения биомассы;  $f_S$  — коэффициент эмиссии компонента  $S$ ;  $\beta$  — доля сгоревшей биомассы. При получении большинства из рассмотренных продуктов, однако, используется в качестве основного параметра энергия излучения FRP (в МВт) или плотности излучения FRP/S (FRPS, МВт/км<sup>2</sup>). В таком случае для нахождения покомпонентной массы эмиссии применяется коэффициент перевода FRP в сгоревшую биомассу, определённый путём калибровки или эмпирически.

В GFED v4.1s используются данные по площади гарей (по продукту MCD64A1) для оценки погибшей биомассы, по которой далее рассчитывается покомпонентная

эмиссия на основании табличных или расчётных коэффициентов погибшей биомассы. В GICC используется региональная калибровка числа выявленных температурных аномалий World Fire Atlas (WFA, сенсор ATSR) по оценке площади  $A$  пожаров на основе продукта по оценке гарей GBA2000, с дальнейшим использованием табличных коэффициентов биомассы и доли сгоревшей биомассы.

Таблица 2.3.2.1 — Характеристика рассмотренных глобальных информационных продуктов по оценке эмиссии климатически активных веществ с применением ДЗЗ

Продукт	Сенсор	Период (год) и врем. разрешение	Пространст. разрешение	Методика подсчёта эмиссий	Рассчитанные эмиссии
<b>GFAS v1.2</b>	MODIS	2003 – наст. вр., день	0,1°	FRP, кор. FRP vs сгоревшая биомасса по GFED v4.1s, табл. регион. коэф. эмиссий	C, CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , BC, OC +32 поллютанта
<b>GICC</b>	ATSR и VIRS	1997–2005, месяц	1°	Кор. число актив. термоаномалий vs площ. гарей, табл. регион. знач. биомассы и коэф. эмиссий	CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , BC, OC +16 поллютантов
<b>FINN v2.5</b>	MODIS и VIIRS	2002–2021 (MODIS), 2012–2021 (VIIRS), день	0,1°; 1 км	Площ. пожара = пиксель Active Fire Product, табл. регион. знач. биомассы и коэф. эмиссий	CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , BC, OC +22 поллютанта
<b>FEER v1.0-GFAS1.2</b>	MODIS	2003 – наст. вр., день	0,1°	Расчёт коэф. эмис. аэрозолей по MODIS AOT; пропорц. расчёт др. коэф. эмиссий; FRP по GFAS	C, CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , BC, OC +24 поллютанта
<b>QFED v.2.5r1</b>	MODIS	2000–2022, день	0,1°	FRP/S; кор. FRP с GFED; регион. коэф. эмиссий по аэрозолям MODIS AOT	CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , BC, OC +12 поллютантов
<b>GFED v4.1s</b>	ATSR и VIRS (1997–2001) MODIS (с 2001 г.)	1997 – наст. вр., месяц	0,25°	Площадь гарей, малые пожары по FRP, табл. знач. биомассы и коэф. эмис.	C; сгор. биомасса → коэф. для CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , BC, OC +34 поллютанта

Методики, опирающиеся на FRP по MOD14/MYD14 (GFAS v1.2, QFED v2.5r1) используют калибровку FRP по оценкам сгоревшей биомассы или эмиссии компонента по GFED v4.1s для получения калибровочных коэффициентов перевода энергии излучения FRP в сгоревшую биомассу по регионам или растительным биомам. В методике FEER v1.0-GFAS v1.2 используются откалиброванные значения FRP по GFAS v1.2. В продукте FINN v2.5 площади  $A$  пожара присваивается площадь пикселя согласно информации о выявленных пожарах, содержащейся в продуктах MCD14L и VIIRS Active

Fire Product (NASA FIRMS). При этом биомасса определяется как произведение площади пикселя и табличного значения плотности биомассы.

В большинстве методик используются табличные значения коэффициентов эмиссий по различным биомам и регионам. В методе QFED применяется оценка оптической толщины аэрозолей (AOT) для оценки региональных калибровочных коэффициентов. В FEER v1.0 коэффициенты эмиссии рассчитываются на основе AOT отдельно для каждой ячейки.

Исходные данные были получены по состоянию на конец сентября 2023 г. Оценки эмиссий продуктов были агрегированы до ежемесячного уровня с сохранением исходного пространственного разрешения. Были учтены только ячейки, находящиеся на территории России. В большинстве продуктов оценки эмиссий представлены в виде распределения плотности эмиссии за единицу времени ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Для получения массы эмиссии использовалось произведение данной величины, времени наблюдения и площади ячейки. В случае GFED v4.1s эмиссии рассчитывались как произведение коэффициента эмиссии компонента и объёма сгоревшей биомассы.

Для всех продуктов были рассчитаны суммарные ежегодные и среднемесячные эмиссии по  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{CH}_4$ , OC, BC и углероду C. Для методик, которые не предоставляют прямую оценку эмиссии углерода (GICC, FINN v2.5 и QFED v2.5-r1), она была рассчитана на основе доли углерода в атомарной массе компонентов  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{CH}_4$ , OC и BC. Следует отметить, что в силу наличия артефактов в данных и низкого пространственного разрешения ( $1^\circ$ ) продукт GICC вне контекста среднемноголетних и среднемесячных эмиссий не рассматривался.

Согласно данным GFED v4.1s вклад природных пожаров на территории России в ежегодную мировую эмиссию углерода от природных пожаров составляет от 2 до 17 % в зависимости от конкретного года. В зависимости от продукта доля природных пожаров на территории России в мировой эмиссии составляет 6–10 % ( $\text{CO}_2$ ), 6,5–15 % (CO) или 7,5–18 % (чёрный + органический углерод).

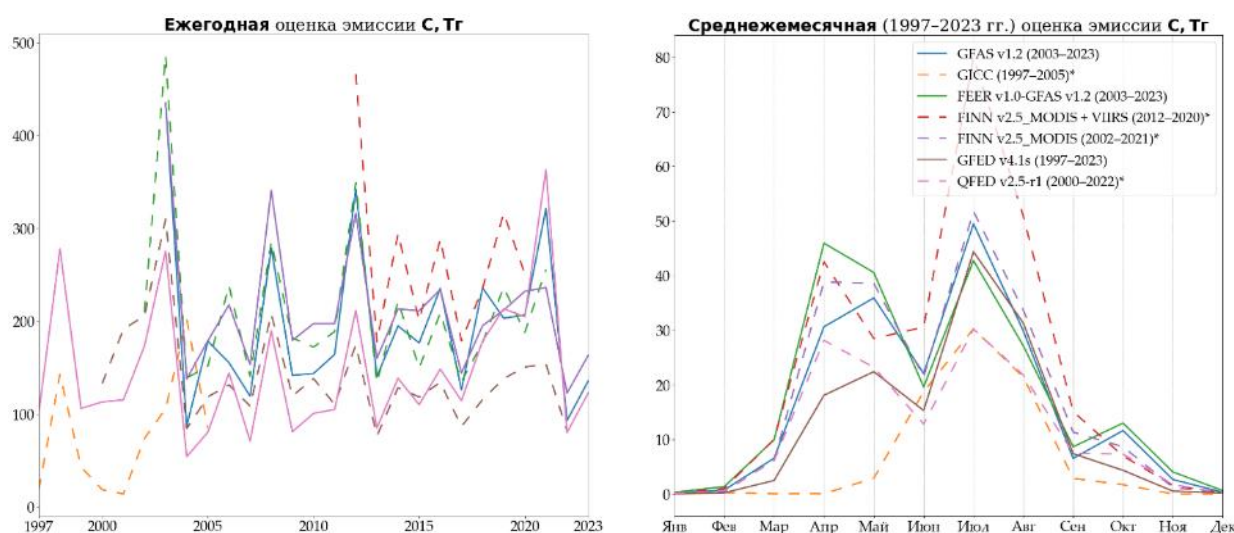


Рисунок 2.3.2.1 — Ежегодное и среднемноголетнее сезонное распределение эмиссии углерода от природных пожаров на территории России согласно глобальным продуктам ДЗЗ. Символом «\*» или пунктиром отмечены продукты, для которых эмиссиях углерода рассчитана на основании других углеродсодержащих компонентов

Полученная ежегодная и среднемесячная оценка эмиссии углерода от природных пожаров на территории России представлена на рисунке 2.3.2.1. Видно, что порядок и динамика многолетней оценки рассмотренных продуктов ДЗЗ обладают высокой согласованностью. Максимальная годовая эмиссия углерода согласно полученным данным приходится на годы максимальной активности лесных пожаров и площади

усыхающих и погибших лесов на территории России (2003, 2012, 2021). Среднемесячные оценки эмиссии углерода имеют два пика: весенний (апрель – май), соответствующий пожарам вне лесной зоны и низовым пожарам в лесной зоне с относительно низкой гибелью лесов, и летний (июль – август), соответствующий верховым пожарам, приводящим к значительной гибели лесов. Единственным продуктом, в котором проведена дополнительная коррекция для учёта гибели лесов в бореальной зоне, является GFED v4.1s.

В таблице 2.3.2.2 представлены взаимные коэффициенты детерминации  $R^2$  ежегодных оценок эмиссии углерода между рассмотренными продуктам ДЗЗ для территории России. Наблюдается сильная ( $R^2 > 0,8$ ) корреляция между продуктами, оценка эмиссии которых основана на FRP (GFAS v1.2, FEER v1.0-G1.2, QFED v2.5r1). При этом наблюдается заметно более слабая корреляция с оценками GFED v4.1s, хотя данный продукт использовался для калибровки GFAS и QFED. В случае FINN v2.5 наблюдается сильная корреляция алгоритма с другими методиками на основе FRP.

В большинстве корреляционных пар наблюдаются более высокие коэффициенты корреляции в случае отдельного рассмотрения сезонных пиков пожарной активности (апрель – май и июль – август).

Таблица 2.3.2.2 — Коэффициенты корреляции между рассматриваемыми продуктами ДЗЗ

Коэффициент $R^2$	GFAS v1.2	GICC	FINN v2.5 MODIS*	FINN v2.5 MODIS+VIIRS*	FEER v1.0-G1.2	QFED v2.5-r1*	GFED v4.1s
GFAS v1.2	–	0,332 2003– 2005	0,815 2003–2021	0,819 2012–2020	0,84 2003– 2023	0,771 2003– 2022	0,709 2003– 2023
GICC	0,332 2003– 2005	–	0,065 2002–2005	–	0,218 2003– 2005	0,055 2000– 2005	0,038 1997– 2005
FINN v2.5 MODIS	0,815 2003– 2021	0,065 2002– 2005	–	0,999 2012–2020	0,894 2003– 2021	0,796 2002– 2021	0,485 2002– 2021
FINN v2.5 MODIS+VIIRS	0,819 2012– 2020	–	0,999 2012–2020	–	0,826 2012– 2020	0,747 2012– 2020	0,514 2012– 2020
FEER v1.0-G1.2	0,845 2003– 2023	0,218 2003– 2005	0,894 2003–2023	0,826 2012–2020	–	0,932 2003– 2023	0,463 2003– 2023
QFED v2.5-r1	0,771 2003– 2022	0,055 2000– 2005	0,796 2002–2021	0,747 2012–2020	0,932 2003– 2022	–	0,386 2000– 2022
GFED v4.1s	0,709 2003– 2023	0,038 1997– 2005	0,485 2002–2021	0,514 2012–2020	0,463 2003– 2023	0,386 2000– 2022	–

Регионами России с максимальной среднемноголетней эмиссией углерода от природных пожаров являются регионы с преобладанием лесных пожаров: Якутия (36,7 Тг/г), Амурская область (22,4 Тг/г), Хабаровский край (18,0 Тг/г), Забайкальский край (14,1 Тг/г) и Иркутская область (11,4 Тг/г).

На рисунке 2.3.2.2 представлены диаграммы среднемесячной эмиссии углерода по некоторым субъектам РФ с характерным режимом пожарного сезона (весна, лето, два пика). В регионах с преобладанием лесных пожаров максимум эмиссий приходится на

летний сезон, в то время как вне лесной зоны пик эмиссии соответствует весеннему, реже летнему или осеннему сезону.

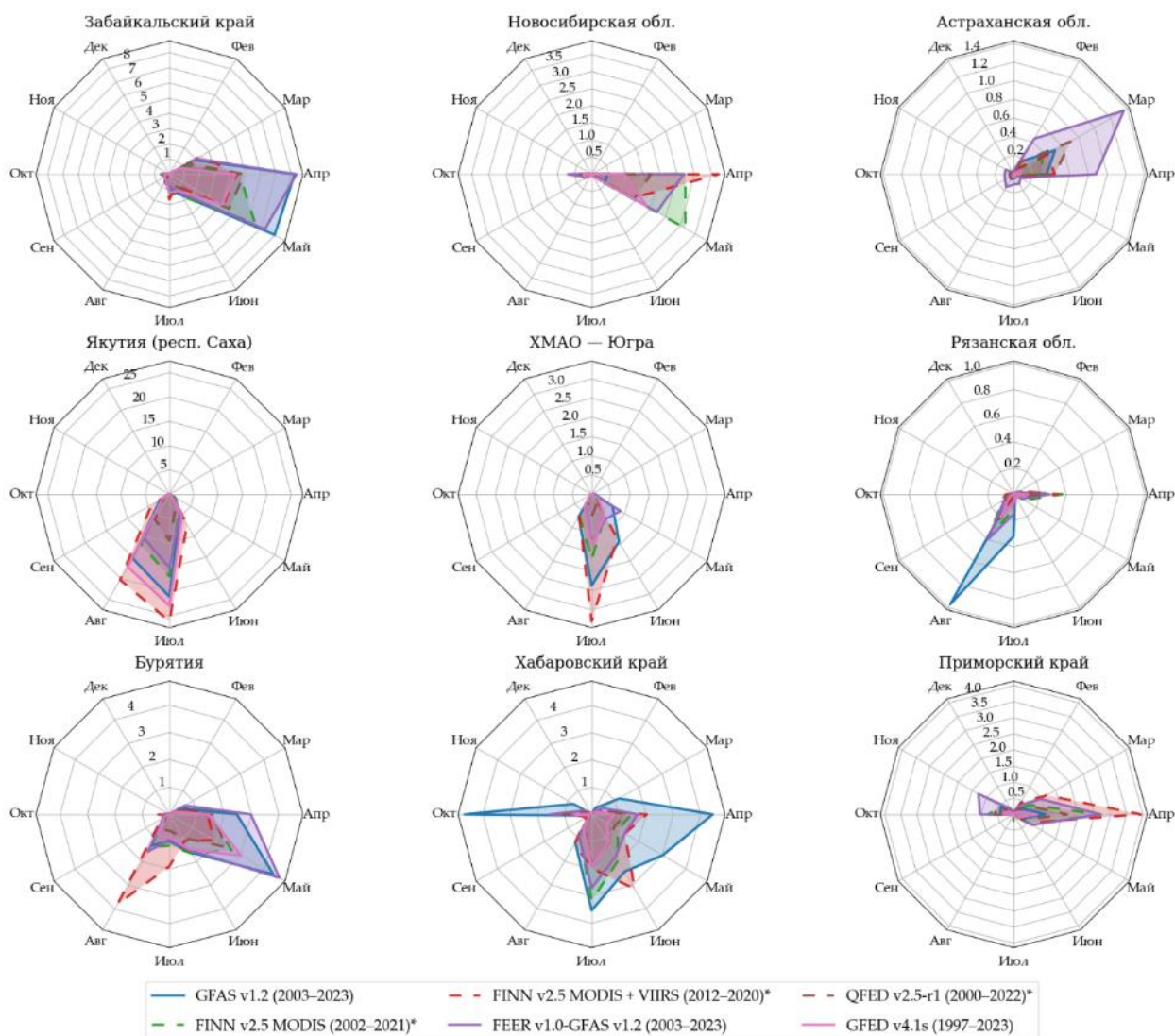


Рисунок 2.3.2.2 — Среднемноголетнее сезонное распределение эмиссии углерода от природных пожаров по выборочным субъектам РФ за 2003–2021 гг. (Тг/год)

В случае некоторых регионов наблюдаются anomalно высокие показатели по GFAS v1.2 или FEER v1.0-G1.2. Высокие оценки согласно FEER наблюдаются в Астраханской области, где основным горючим материалом для эмиссии углерода служит тростниковая растительность дельты Волги. Подобные ландшафты обладают высокими запасами фитомассы (5–7 т/га) и подвержены ежегодным пожарам с сильным фиксируемым задымлением (высокими выбросам аэрозолей), с оценкой усреднённой эмиссии углерода в 3,4 т/га. Методика FEER v1.0-GFASv1.2, где коэффициенты эмиссий рассчитываются на основании корреляции с наблюдаемыми оптическими характеристиками аэрозолей, вероятно, учитывает эмиссии от подобных пожаров значительно точнее остальных рассмотренных продуктов ДЗЗ, в которых используются генерализованные оценки биомассы и коэффициенты эмиссии.

В Хабаровском крае и Еврейской автономной области наблюдаются весенний и осенний пики эмиссии углерода; в Хабаровском крае также присутствует летний пик эмиссии, связанный с лесными пожарами. В описываемых регионах на территории Среднеамурской низменности значительная часть весенних и осенних пожаров приходится на лугово-болотные ландшафты с высокой долей ежегодной повторяемости, что в совокупности с использованием высокого коэффициента для эмиссий заболоченных



ландшафтов в GFAS v1.2 приводит к наблюдаемым высоким оценкам эмиссии в данном географическом регионе.

Для анализа распределения эмиссии углерода по классам растительного покрова были использованы карта растительного покрова России ИКИ РАН и ~1 км данные продукта оценки эмиссий FINN v2.5. Пространственное разрешение исходной карты растительности было загрублено до 920 м с генерализацией по методу mode (наиболее частого значения в пикселе). Исходные ежегодные точечные данные FINN v2.5 1 км были перепроецированы в систему координат карты растительности ИКИ РАН, агрегированы по одинаковым значениям широты, долготы и класса растительности, использованным в продукте FINN (MCD12Q1), и растеризованы с теми же параметрами, что и карта растительности ИКИ РАН. Пространственное совмещение карт по указанной методике проводилось по ежегодным парам растр карты растительности — эмиссии FINN v2.5. Результат распределения эмиссий по классам растительности на основе карты ИКИ РАН представлен на рисунке 2.3.2.3 (представлены оценки FINN только по MODIS).

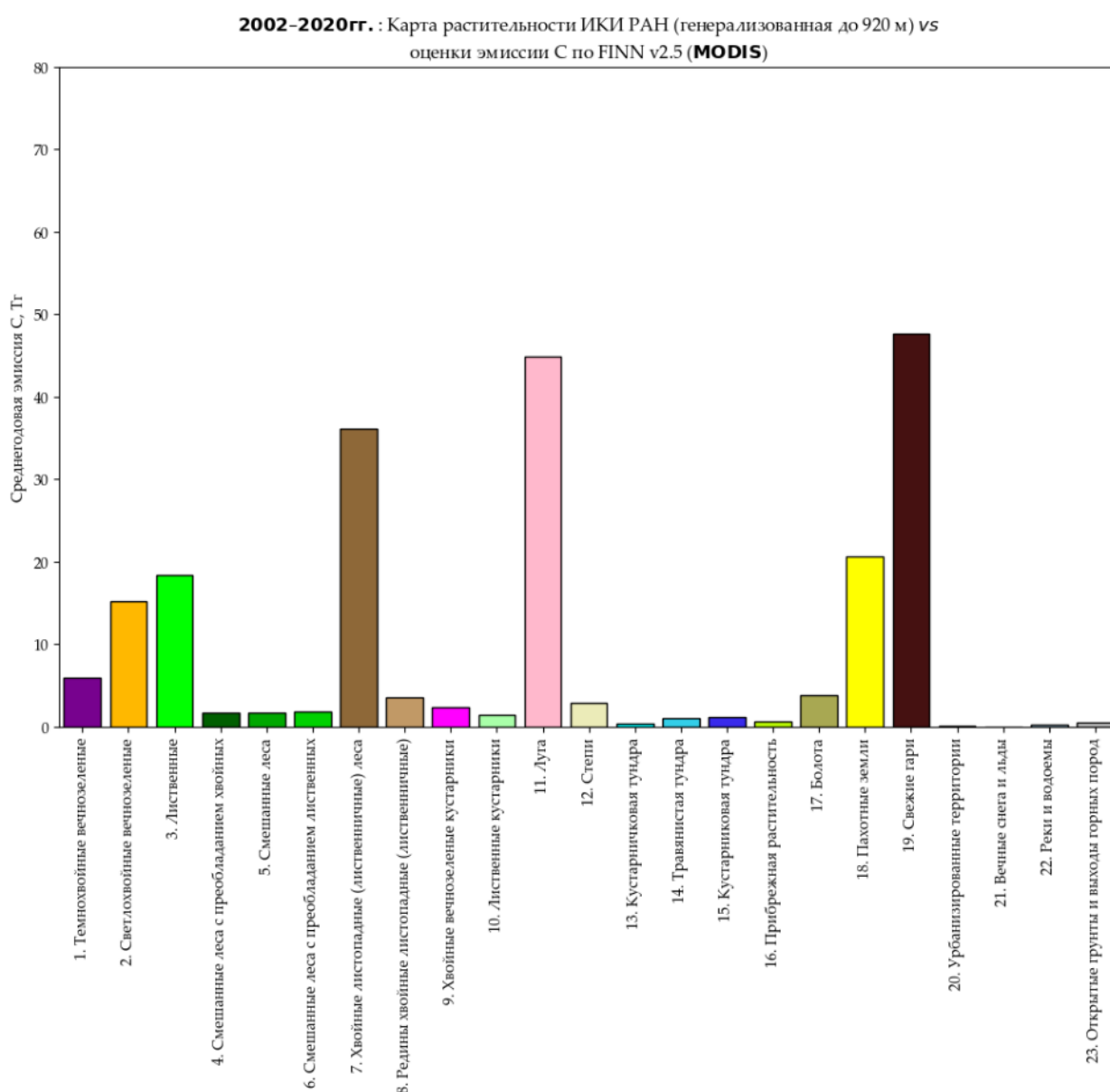


Рисунок 2.3.2.3 — Распределение усреднённых за 2002–2020 гг. значений объема эмиссии углерода от природных пожаров по классам на основе карты растительности ИКИ РАН согласно FINN v2.5 (только MODIS)

В FINN v2.5 используется генерализованная типизация растительности по классификации IGBP; на территорию России приходится только шесть классов: луга (*англ.* grassland), травяно-кустарниковая растительность (shrubland), бореальные леса, умеренные леса, умеренно вечнозелёные леса, пашни. В случае некоторых классов по карте ИКИ РАН (сосняки и лиственничники) большая доля эмиссии согласно FINN приходится на классы лугов и травяно-кустарниковой растительности, а не на бореальные леса. Причиной данных расхождений могут быть различия в определениях классов, принятые в классификации IGBP и ИКИ РАН.

Интерес также представляет среднесуточная оценка эмиссии углерода от пожаров на лугах и пашнях в 65 Тг/г (30 % от общей эмиссии), поскольку основное внимание при оценке выбросов углерода в России связано с лесными пожарами. Это наблюдение требует дальнейшего изучения. Дополнительного исследования также требует оценка эмиссии на территории свежих гарей согласно карте растительности ИКИ РАН.

GFAS v1.2: суммарная эмиссия углерода (C) за 2003–2021 гг.

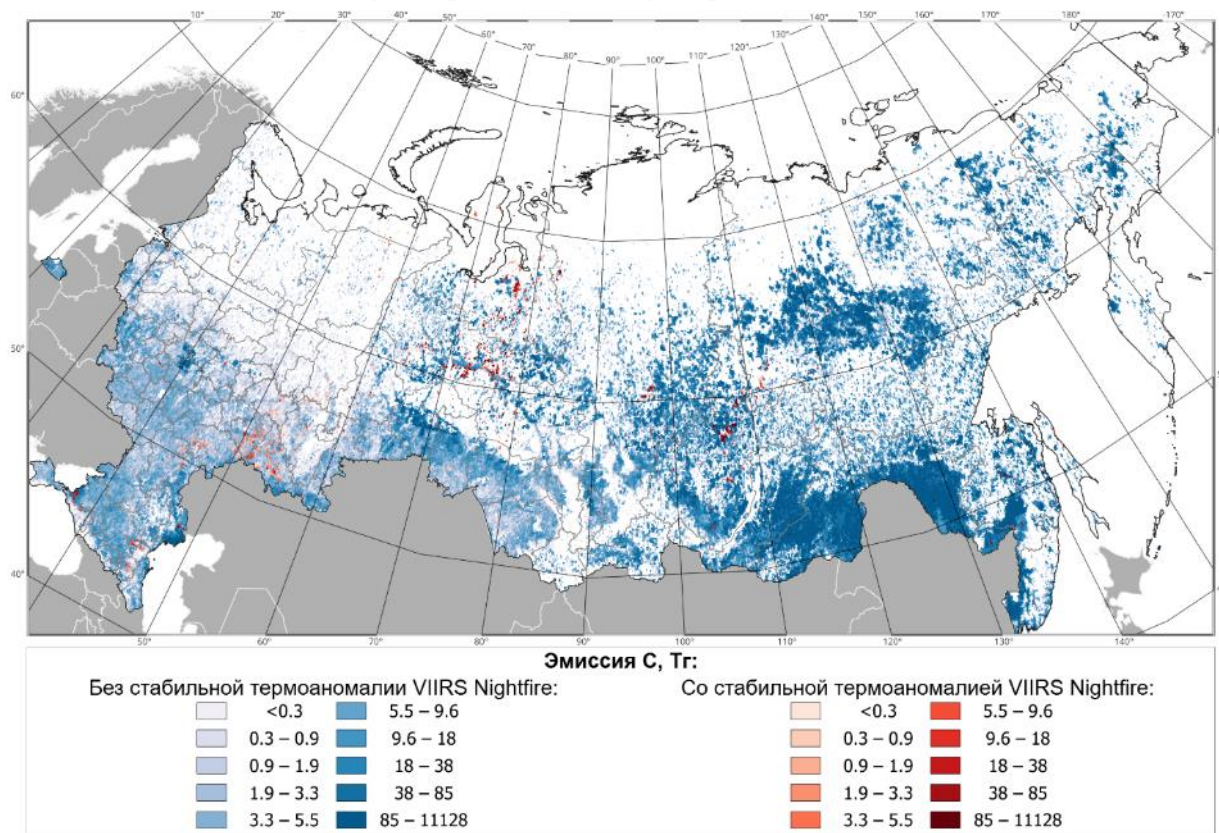


Рисунок 2.3.2.4 — Карта суммарной эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на примере продукта GFAS v1.2. Красным выделены ячейки, содержащие эмиссию углерода от природных пожаров по GFAS v1.2 и стационарную термоаномалию по VIIRS Nightfire, синим — прочие ячейки с эмиссией углерода по GFAS v1.2

Стационарные температурные аномалии вносят шум в данные при оценке эмиссии углерода от природных пожаров. В силу этого представляет интерес оценка их влияния на итоговую оценку эмиссии углерода от природных пожаров. Для его фильтрации применялись контуры статичных термоаномалий согласно продукту VIIRS Nightfire (далее статичные, или стационарные термоаномалии VNF). Результатом продукта VNF являются контуры статичных термоаномалий за 2012–2021 гг., верифицированных для территории России. В России стационарные термоаномалии представлены газовыми факелами на объектах нефтегазовой промышленности (ок. 75 % от общего числа), иными промышленными предприятиями (главным образом металлургические), объектами

лесопромышленного комплекса, полигонами ТБО и вулканами. Всего на территории страны зафиксировано 2322 стационарные термоаномалии. В приведённых в данном параграфе данных фильтрация стабильных термоаномалий была проведена для продуктов с пространственным разрешением 0,1°.

Пример карты продукта оценки эмиссии от природных пожаров (GFAS v1.2) с фильтрацией ячеек, содержащих стационарные термоаномалии VNF, представлен на рисунке 2.3.2.4.

Результат фильтрации суммарных многолетних данных представлен в таблице 2.3.2.3. Для продуктов с пространственным разрешением 0,1° среднее число ячеек с выявленными природными пожарами составляет около 40%, и только в около 2,5 % из них (или в 1 % от всех ячеек) фиксируются стационарные температурные аномалии VIIRS Nightfire. При этом для алгоритмов на основе детектора пожаров MOD14/MYD14 (GFAS v1.2, FEER v1.0-GFAS1.2, QFED v2.5r1) оценка эмиссии углерода от стационарных температурных аномалий VNF заметно выше, чем в случае FINN v2.5, имеющим в основе детекторы пожаров NASA FIRMS.

Таблица 2.3.2.3 — Статистика за 2003–2021 гг. по ячейкам продуктов ДЗЗ, содержащим эмиссии углерода от природных пожаров и статичные термоаномалии по VIIRS Nightfire

Параметр		GFAS v1.2	FINN v2.5 MODIS	FINN v2.5 MOD+VRS	FEER v1.0-G1.2	QFED v2.5r1	GFED v4.1s
Число ячеек	Всего на территории России	285 093	285 059	285 059	285 135	285 135	44 222
	С эмиссией С от природных пожаров, %	40,6	42,6	37,2	40,1	43,3	66,3
	С эмиссией С и термоаномалией VNF, %	0,91	0,95	1,03	0,91	0,98	3,52
Сумм. эмис. С, Тг	Всего	3755	3903	2333	4052	2595	2869
	Ячейки с термоаномалией VNF, %	5,1	2,1	2,9	6,6	4,3	4,5

В случае ~1 км версии алгоритма продукта FINN эмиссия углерода, отнесённая к статичным термоаномалиям VNF, составила 0,5 % в случае версии MODIS продукта и 1,1 % в случае версии MODIS + VIIRS. Всего эмиссии углерода по версии MODIS + VIIRS продукта FINN присутствуют в 40 % от общего числа контуров термоаномалий VNF.

Проведённая оценка доли эмиссии от статичных термоаномалий позволяет сделать вывод, что для большинства задач подобная фильтрация, особенно для продуктов на основе MCD14L и VIIRS Active Fire Product (FINN v2.5), не является необходимой. Более того, подобная фильтрация в случае работы с продуктами низкого пространственного разрешения (0,1°) может приводить к чрезмерной коррекции.

Сравнительный анализ глобальных продуктов оценки эмиссий от природных пожаров на основе ДЗЗ выявил значительную взаимную корреляцию данных для территории России. Стоит отметить, что в силу применения табличных значений биомассы или коэффициентов эмиссий для биомов/регионов оценки рассмотренных продуктов могут быть слишком генерализованными для учёта уникальных локальных особенностей ландшафтов (например, повышенная эмиссия углерода от пожаров в дельте Волги). Применение статичных коэффициентов в большинстве методик не позволяет учитывать различный сезонный характер лесных пожаров на территории России. Анализ распределения эмиссии углерода по классам растительности показал значительный (30%)

вклад пожаров вне лесной зоны в среднемноголетнюю эмиссию углерода в России. Дальнейшим направлением исследований может стать разработка метода оценки эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основе существующих информационных продуктов ИКИ РАН.

### ***2.3.3 Пространственное моделирование распределения открытых песков и дефлированных под влиянием антропогенных нагрузок территорий для мониторинга процессов опустынивания***

В 1970-1980-х гг. из-за распашки и чрезмерного выпаса большая часть песчаных земель Калмыкии в районе Чёрных земель лишилась растительного покрова. Благодаря фитомелиоративным мероприятиям, снижению пастбищных нагрузок и благоприятной климатической флуктуации удалось предотвратить экологическое бедствие в регионе. Однако после периода устойчивого состояния в 2002–2010 гг. вновь усилились процессы опустынивания, и площадь открытых песков на Чёрных землях к 2019 г. приблизилась к значениям начала – середины 1990-х гг., а большая часть новых очагов опустынивания возникла в Астраханской области. Пастбищные нагрузки, являясь одним из ключевых факторов динамики состояния экосистем, распределены неравномерно, из-за этого требуется уточнение пространственных закономерностей антропогенной нагрузки на ландшафты.

Животноводческие фермы («чабанские точки», места концентрации скота) в регионе исследований (Чёрные земли — Калмыкия и западная часть Астраханской области) выделялись на основе экспертной интерпретации спутниковых изображений видимого диапазона прибора Landsat-5 TM на 1984–1986 гг. и Landsat-8 OLI на 2020 г. пространственного разрешения 30 м. Прилегающие к животноводческим фермам участки обладают достаточно четкими дешифровочными признаками: выделяются цветом и формой. Также животноводческие фермы являются «узлами» сходящихся грунтовых дорог, поэтому при отсутствии других признаков скопление дорог косвенно свидетельствует о наличии фермы. В непосредственной близости от ферм и поилок, как правило, могут находиться участки, полностью лишённые растительного покрова: открытые пески и котловины выдувания. Плотность животноводческих ферм может быть одним из показателей антропогенной нагрузки, которая ведет к опустыниванию. Из анализа пастбищных земель исключались используемые пахотные земли, как богарные, так и орошаемые.

Как показывают проведенные ранее исследования зона влияния выпаса скота распространяется на расстояние до 3 км от животноводческих ферм. Поэтому площадь пастбищ определялась как площадь земель, которые попадают в зону радиуса 3 км вокруг животноводческих ферм. Также были определены площади пастбищ в меньшем радиусе с интервалом 0,5 км. На более близкие к загонам для животных участки оказывается большее воздействие, поэтому важно представлять площади пастбищ на разном удалении от ферм. Для этого строились буферные зоны радиусом от 0,5 до 3 км, после чего они объединялись в один объект, а также определялось пересечение буферных зон от смежных ферм. После с получившимися геоинформационными слоями выполнялись оверлейные операции в геоинформационной программе: пересечение границами муниципальных образований, почвенных контуров. Определялись площади открытых песков и дефлированных территорий, попадающие в границы разной удаленности от животноводческих ферм. Также были определены площади потенциально возможных к использованию пастбищ с помощью инструмента геоинформационной обработки «полигоны Вороного». Этот инструмент позволяет построить полигоны вокруг точечных объектов, объединив площади, которые расположены к данной точке ближе, чем к любой другой. Таким образом, были выделены наиболее близкие к каждой ферме участки. Из анализа исключались соровые понижения и солончаки по разработанному методу, который представлен в разд. 2.4.1 настоящего отчёта.

Статистические данные о поголовье скота в разрезе муниципальных районов приводятся по Базе данных показателей муниципальных образований (<https://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst.htm>). Достоверные данные в разрезе районов по поголовью скота доступны только с 2007 г. (это связано как с наличием данных в открытом доступе, так и изменением площадей пограничных между Астраханской областью и Калмыкией районов), поэтому пастбищные нагрузки для более раннего периода определены не были. Пастбищные нагрузки определялись как отношение среднего поголовья в условных головах овец на одну ферму в пределах района к площади полигона Вороного вокруг фермы. В реальности контуры пастбищ имеют более сложную форму и могут иметь площадь как большую, так и меньшую. Это же касается и поголовья скота, особенно учитывая большую долю неофициального поголовья. Но поскольку не все участки поставлены на кадастровый учет, а их границы не всегда соблюдаются при выпасе, то более точные способы определения актуальных площадей затруднены. Также в границах полигонов Вороного рассчитывались площади открытых песков согласно ранее полученным данным и сопоставлялись с величинами пастбищных нагрузок для полигонов.

Всего идентифицирована 1861 животноводческая ферма на 1984–1986 гг. и 1714 ферм на 2020 г., из которых 1275 не изменили своего местоположения с 1984 г. При этом на территории Калмыкии количество ферм уменьшилось на 312 (сильнее всего в Черноземельском районе — на 184), а в Астраханской области, наоборот, увеличилось на 165. Площадь пастбищ по полигонам Вороного вокруг животноводческих ферм после вычета соров, солончаков, пашни и населенных пунктов на 2020 г. равна 3,65 млн га, что достаточно точно согласуется со статистическими данными (3,69 млн га). При этом 78,3 % пастбищ расположены в трехкилометровой зоне вокруг животноводческих ферм, следовательно, подвергаются наиболее сильным нагрузкам. В 1980-х гг. площадь пастбищ составляла более 4 млн га, из которых на трехкилометровую зону приходилось 73,7 %.

Воздействие выпаса на почвенно-растительный покров зависит от физических свойств почвенного покрова: на суглинистых почвах верхние горизонты уплотняются, а на песчаных почвах, наоборот, разрушаются. Поэтому пастбища на суглинистых почвах более устойчивы к выпасу и дефляции. На суглинистых почвах лишённые растительного покрова участки концентрируются в радиусе 0,5–1 км вокруг ферм. По мере облегчения гранулометрического состава почв пастбищ участки с открытыми песками проявляются на все больших расстояниях от ферм. При этом в 1984 г. только 37 % всех дефлированных площадей приходилось на трехкилометровый радиус вокруг ферм, к 2020 г. этот показатель увеличился до 51 %. Это связано с тем, что в 1970–80-х гг. основные площади подвижных песков были вызваны распашкой и располагались на месте современного заповедника «Черные земли», в окрестностях которого к тому времени уже не было мест концентрации скота. К 2020 г. практически во всех исследованных районах увеличилась доля дефлированных земель в трехкилометровых окрестностях ферм. Это стало результатом нерационального использования пастбищ и превышения допустимых нагрузок скота при выпасе.

В 1980-х гг. на территории Калмыкии содержалось около 3,3 млн овец и коз, минимума поголовье достигло к 2000 г. (0,6–0,7 млн голов), на период 2010–2020 гг. по данным статистики поголовье составляло около 2,5 млн голов или 1,4 тыс. голов овец на одну животноводческую ферму, 2,4 тыс. усл. голов овец с учетом крупного рогатого скота, лошадей и верблюдов. Согласно Постановлению Правительства Калмыкии от 27 апреля 2006 г. № 158 «О нормах нагрузки скота на пастбища на территории Республики Калмыкия» нормы пастбищных нагрузок устанавливаются на уровне 0,3–0,5 усл. голов овец/га. Данное требование в 2007–2020 гг. соблюдалось только на 19,5 % территории исследования (рисунок 2.3.3.1). При этом участки с наибольшими пастбищными нагрузками на песчаных почвах совпадают с местами локализации открытых песков. Если учитывать кратковременные превышения допустимых



пастбищных нагрузок в отдельные годы при максимальном показателе поголовья за 2007–2020 гг., то превышения допустимых величин были на 87 % площади пастбищ. На большей части площади превышение составляет в 2–3 раза.

В результате сопоставления пастбищных нагрузок и площадей открытых песков и дефлированных земель в окрестностях животноводческих ферм подтверждено, что пастбищные нагрузки наиболее сильно влияют на участки на легких по гранулометрическому составу почвах (рисунок 2.3.3.2). Отмечена значимая сильная корреляционная связь доли открытых песков и как среднемноголетних пастбищных нагрузок ( $r = 0,82$ ), так и максимальных за период ( $r = 0,88$ ). Стоит отметить, что даже кратковременные превышения пастбищных нагрузок более 3 усл.голов овец/га на супесчаных и песчаных почвах приводят к резкому увеличению площади лишенных растительного покрова участков. Безусловно, кроме непосредственно пастбищных нагрузок на площадь подвижных песков влияет интенсивность эоловых процессов, обусловленных синоптической ситуацией и ветровой нагрузкой, тем не менее выпас препятствует самозарастанию песков.

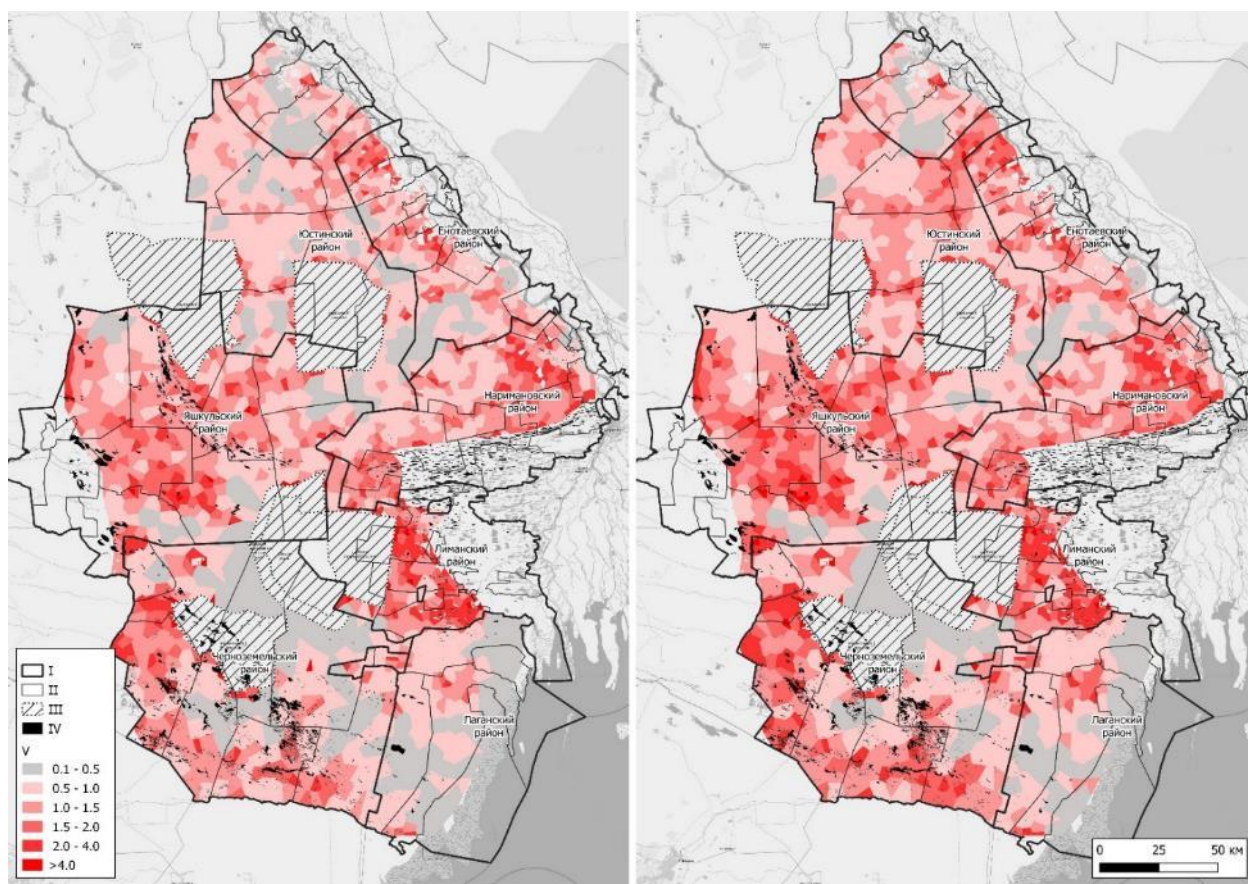


Рисунок 2.3.3.1 — Пастбищные нагрузки за 2007–2019 гг.: среднемноголетние (слева) и максимальные (справа) (I — границы районов, II — границы муниципальных образований, III — границы ООПТ, IV — соровые понижения, солончаки и водоемы, V — пастбищные нагрузки, усл. голов овец на гектар)

Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования Земли позволяет выявить пространственную структуру антропогенных нагрузок на ландшафты. Животноводческие фермы обладают достаточно четкими дешифровочными признаками, поэтому могут быть достоверно картографированы. Закономерности их пространственного распределения могут служить основой для анализа величин пастбищных нагрузок. В совокупности с данными о поголовье скота становится возможным расчет величин пастбищных нагрузок, а геоинформационная обработка позволяет включить в анализ данные о почвенном покрове, продуктивности земель, их

приуроченности к единицам административно-территориального деления. Дальнейшие исследования могут быть направлены на исследование изменений растительного покрова на разном удалении от животноводческих ферм в зависимости от пастбищных нагрузок и почвенно-растительных условий с применением как натуральных, так и дистанционных методов.

Установлено, что к 2020 г. по сравнению с 1980-ми гг. уменьшилось количество животноводческих ферм на суглинистых почвах, а на песчаных почвах и песках, наоборот, увеличилось. При том что площадь пастбищ осталась практически неизменной. Это привело к росту пастбищных нагрузок на легких по гранулометрическому составу почвах. Более чем на 80 % территории пастбищ превышены допустимые нагрузки выпаса скота. Результатом этого стала активизация процессов опустынивания в регионе. Представленные на рисунке 2.3.3.2, е эколого-математические модели позволяют спрогнозировать развитие массивов открытых песков и дефлированных территорий в зависимости от величин пастбищных нагрузок.

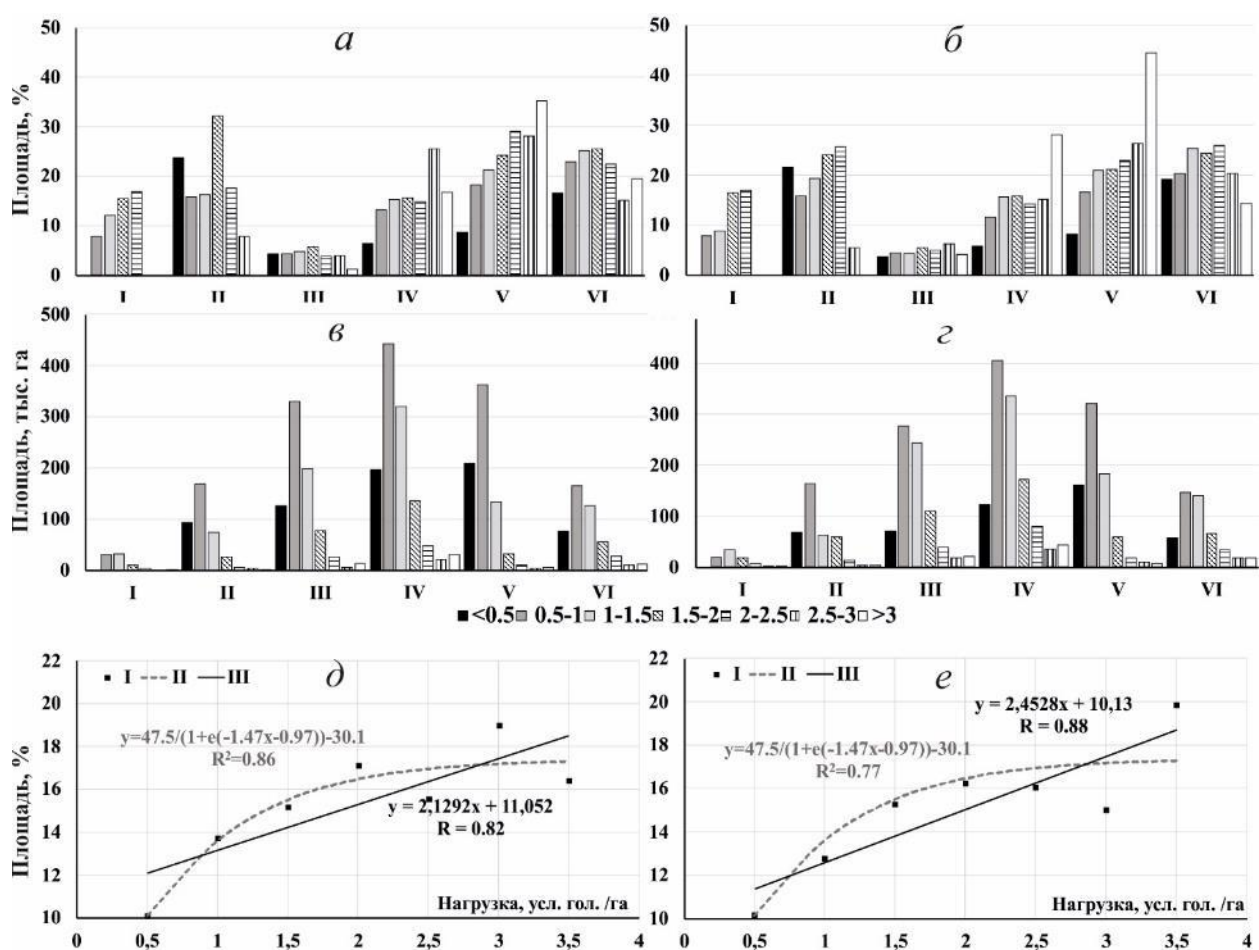


Рисунок 2.3.3.2 — Распределение площадей открытых песков и дефлированных территорий по пастбищам с разной нагрузкой (усл. гол. овец/га, а — среднемноголетняя нагрузка, б — максимальная нагрузка) и площадей пастбищ с разной нагрузкой (усл. гол. овец/га, в — среднемноголетняя нагрузка, г — максимальная нагрузка; I — глинистые и тяжелосуглинистые, II — среднесуглинистые, III — легкосуглинистые, IV — супесчаные, V — песчаные, VI — пески) и связь доли открытых песков и дефлированных площадей с пастбищными нагрузками (д, е — среднемноголетняя и максимальная нагрузка, I — фактические данные, II — аппроксимация сигмоидой, III — линейная регрессия)

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

### ***2.4.1 Картографирование соровых понижений и солончаков на основе многолетних данных Landsat для совершенствования методов спутникового мониторинга процессов опустынивания***

Соровые понижения (соры) и приуроченные к ним солончаки являются характерными элементами ландшафтов засушливой зоны и широко распространены на территории Прикаспийской низменности, юге Западной Сибири и в Средней Азии. Ландшафты полупустынной и пустынной зон подвержены процессам деградации из-за регулярных засух и неконтролируемого выпаса скота, поэтому проблема разделения естественных солончаков и лишенных растительного покрова участков из-за дефляции и чрезмерных пастбищных нагрузок при их спутниковом мониторинге актуальна. Для солончаков характерна крайне разреженная растительность или ее полное отсутствие в силу естественных причин, из-за чего они могут быть ошибочно отнесены к деградированным в результате антропогенного воздействия площадям при их картографировании по данным дистанционного зондирования. В последние годы на юге европейской части России интенсифицировалось опустынивание пастбищ под влиянием неблагоприятных гидротермических условий и чрезмерного выпаса домашнего скота, поэтому возникает необходимость спутникового мониторинга этих процессов. Сорковые понижения и солончаки при этом должны картографироваться отдельно, поскольку отсутствие на них растительности является следствием их природных особенностей, а не антропогенного воздействия. Большинство исследований процессов опустынивания и динамики состояния растительности по данным дистанционного зондирования не учитывают наличие естественных солончаков без растительного покрова.

Имеющиеся работы по картографированию сорковых понижений и солончаков опираются на методы экспертного дешифрирования спутниковых изображений высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Поскольку границы сор и солончаков имеют достаточно четкие дешифровочные признаки, а также слабо подвержены многолетним изменениям, то подобный подход оправдан. Единоразово полученные границы на основе визуального дешифрирования спутниковых изображений могут потом использоваться в течение нескольких лет без существенной корректировки. Недостатком такого метода является его значительная трудоемкость, из-за чего расширение границ исследований сопряжено с большими временными затратами. В связи с этим возникает необходимость разработки метода, который позволил бы получить электронную карту сорковых понижений и солончаков с меньшими трудозатратами.

Цель данного исследования заключается в разработке метода картографирования сор и солончаков и их последующее картографирование на российской части Северного Прикаспия для отделения от площадей, лишенных растительного покрова вследствие негативного воздействия природных и антропогенных факторов. Регион исследований включает Астраханскую область, Ставропольский край, Республики Дагестан и Калмыкия.

Общим для всех сор и солончаков признаком является практически полное отсутствие растительного покрова, поэтому их выделение возможно на основе анализа вегетационных индексов, например, NDVI. Наибольший контраст с покрытым растительностью окружающим пространством при этом может быть достигнут в весенний период, когда соры максимально заполнены водой, а окружающие ландшафты покрыты активно вегетирующими растениями. В условиях северных пустынь и опустыненных степей это май и первая половина. При этом возможно перепутывание сор с постоянными искусственными и естественными водоемами, а также открытыми песками и дефлированными территориями без растительного покрова. Отличительной особенностью сор по сравнению с постоянными водоемами является нерегулярное наполнение водой,

а также значительно меньшие глубины. По сравнению с открытыми песками соры практически не зарастают растительностью в течение многих лет, тогда как на протяжении последних десятилетий очаги песков зарастали и появлялись вновь, меняя свое местоположение. Также периодическое заполнение сорных понижений водой или значительное увлажнение гидроморфных солончаков позволяют отделить их по спектрально-отражательным признакам от многолетних песков и дефлированных участков на основе водного индекса NDWI, рассчитываемого как нормализованная разность коэффициентов спектральной яркости в зеленом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Таким образом, основой для картографирования сорных понижений могут стать многолетние спутниковые данные и полученные на их основе среднееголетние значения NDVI и NDWI. Значения NDVI позволяют выделить участки без растительного покрова, а использование NDWI необходимо для разделения периодически заполняемых водой сорных понижений, приуроченных к ним гидроморфных солончаков, постоянных (ежегодно наполняемых) водоемов, открытых песков и дефлированных территорий без растительного покрова. В последние годы из-за пыльных бурь некоторые солончаки могли заноситься песком, по многолетним данным подобные объекты также идентифицируются как соры. Схема картографирования представлена на рисунке 2.4.1.1. Пороговые коэффициенты для значений NDVI и NDWI получены эмпирически путем сравнения результатов со спутниковыми изображениями высокого разрешения, а также электронными картами сорных понижений, озер-ильменей, открытых песков и дефлированных площадей для территории Черных земель в Калмыкии и Астраханской области.

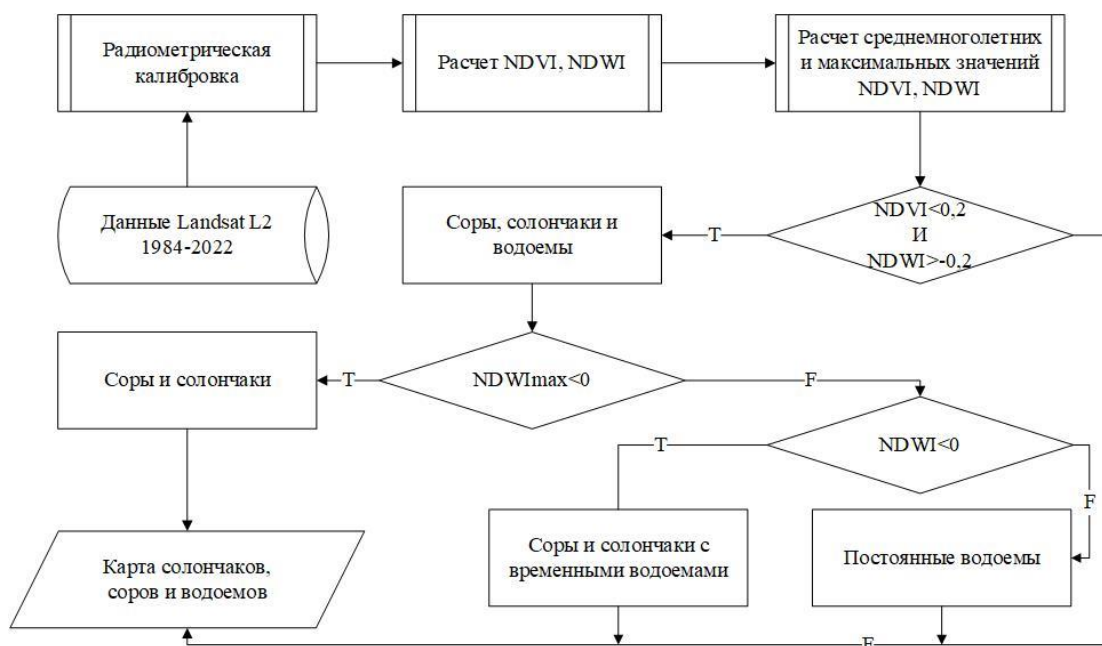


Рисунок — 2.4.1.1 Схема картографирования сорных понижений и солончаков

Сорные понижения и солончаки характеризуются большим диапазоном площадей, при этом множество данных объектов имеют площадь до 10–20 га, что накладывает ограничения на пространственное разрешение используемых спутниковых данных. Достаточным пространственным разрешением среди открытых спутниковых данных обладают только системы Landsat и Sentinel-2. Спутниковые изображения Landsat имеют достаточно большую глубину архива, так как данные разрешения 30 м/пиксель доступны с 1984 г., что является существенным преимуществом перед данными Sentinel-2, которые имеют более высокое пространственное разрешение, но доступны только с 2015 г. Глубина архива важна для картографирования сорных понижений в регионе исследований, поскольку



значительная часть открытых песчаных массивов, существующих сейчас, была образована только в последние несколько лет. Также большая часть очагов опустынивания середины 80-х годов прошлого века в настоящее время восстановилась благодаря организации системы особо охраняемых природных территорий и проведению фитомелиоративных мероприятий, в то время как соры и солончаки не имели растительного покрова на протяжении всего практически сорокалетнего периода, на который доступны спутниковые изображения Landsat-5, 7–9. Использовались спутниковые данные Landsat за период 1984–2022 гг. с интервалом 5–7 лет, прошедшие процедуры коррекции атмосферных искажений и радиометрической калибровки. Учитывались только объекты площадью более трех пикселей Landsat.

Результат картографирования соров, солончаков и водоемов показан на рисунке 2.4.1.2 Хорошо заметно, что открытые пески, появившиеся к 2022 г., но отсутствовавшие в 2013 г., не были выделены. Идентифицировано около 53 тыс. объектов площадью более трех пикселей Landsat. Общая площадь соровых понижений, в том числе с временными водоемами, составила 245 тыс. га, еще 95 тыс. га занимают постоянные, в том числе пресные, водоемы. Суммарно эти категории составляют всего около 2,3 % площади территории изучаемых регионов. Тем не менее, площадь соров и солончаков превышает площадь подвижных песков и дефлированных территорий до периода интенсификации процессов опустынивания в 2019–2021 гг. Около половины солончаков расположено в Калмыкии (101,4 тыс. га солончаков, 25,1 тыс. га постоянных и временных водоемов), также значительные площади в Астраханской области (61,8 тыс. га солончаков, 57,1 тыс. га водоемов) и Дагестане (63,8 тыс. га солончаков, 2,5 тыс. га водоемов). В Ставропольском крае зафиксировано 18,1 тыс. га солончаков и 10,2 тыс. га постоянных и временных водоемов.

Пороговые значения среднеголетних NDVI и NDWI, предложенные для юго-востока европейской части России, могут не подойти для других территорий (например, Средней Азии), так как по мере нарастания аридности биомасса растительности снижается, соответственно различия NDVI между сорами и окружающим пространством будут уменьшаться. Также будет изменяться наполняемость соровых понижений водой и влажность гидроморфных солончаков, из-за чего неизбежны и различия значений NDWI. Использование пороговых значений, подобранных экспертным методом, позволяет осуществлять картографирование без опорной выборки. При наличии информации для обучения алгоритмов классификации можно для картографирования солончаков и соров использовать набор данных дистанционного зондирования, включающий как отдельные спектральные каналы, так и среднеголетние значения NDVI и NDWI. Это направление требует дальнейшей проработки.

Разработанный метод позволяет достаточно эффективно картографировать соровые понижения и сопряженные с ними солончаки на основе многолетних данных NDVI и NDWI. Сравнение полученных данных с результатами экспертного дешифрирования показало, что около половины выделенных вручную контуров солончаков и соров регулярно зарастает растительностью, что также согласуется с проанализированными информационными продуктами типов земного покрова сопоставимого пространственного разрешения.

В результате исследования выявлено, что площадь соров и солончаков превышает площадь подвижных песков и дефлированных территорий до периода интенсификации процессов опустынивания в 2019–2021 гг. Общая площадь соровых понижений с временными водоемами составила 245 тыс. га, еще 95 тыс. га занимают постоянные, в том числе пресные, водоемы. Около половины солончаков расположено в Калмыкии, также значительны их площади в Астраханской области и Дагестане. Таким образом, эта категория земель должна учитываться при спутниковом мониторинге процессов опустынивания и оценке их экологических последствий.



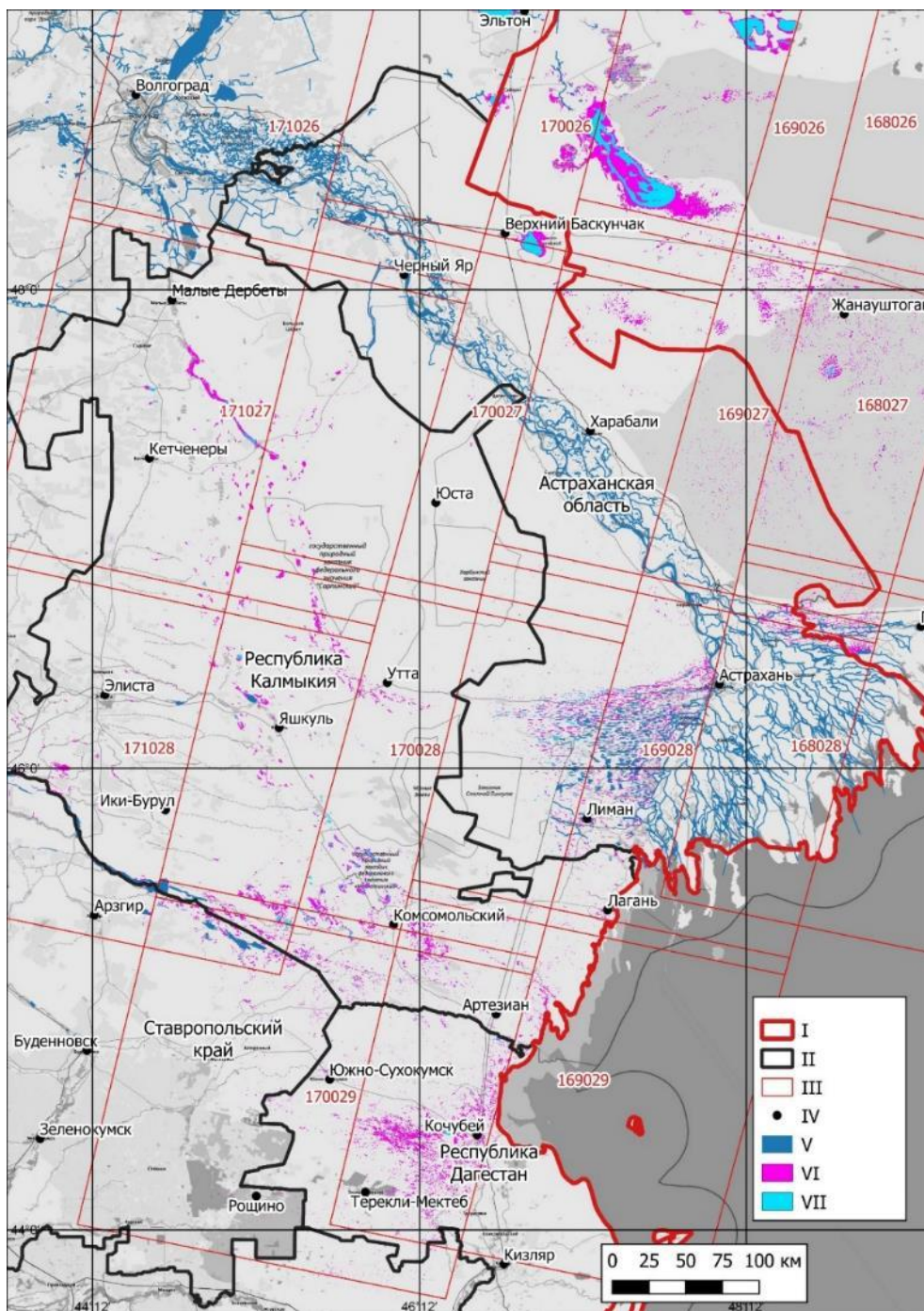


Рисунок 2.4.1.2 — Результат картографирования соровых понижений и солончаков (I — государственная граница, II — границы регионов, III — тайлы Landsat, IV — населенные пункты, V — постоянные водоемы, VI — соры и солончаки, VII — соры, преимущественно покрытые водой и соленые озера)

Поскольку основное отличие соров и гидроморфных солончаков от открытых песков и других лишенных растительного покрова территорий заключается в больших среднемноголетних значениях NDWI, то отделение соров от опустыненных территорий при картографировании последних возможно с использованием только NDWI. Для этого значения NDWI могут быть использованы в качестве признаков при классификации открытых песков и других участков без растительности. Если же анализируется только динамика площадей опустынивания, начиная с некоторого начального отрезка времени, то соры и солончаки существенно на изменение этих площадей не повлияют, т.к. их границы относительно стабильны.

Разделение подвижных песков и дефлированных территорий, лишенных растительного покрова в результате воздействия антропогенных нагрузок и неблагоприятных гидротермических условий, соров и приуроченных к ним гидроморфных солончаков, растительность на которых отсутствует в силу естественных причин, возможно на основе среднесезонных значений водного индекса NDWI.

#### **2.4.2 Исследование изменений границ произрастания древесно-кустарниковой растительности (ДКР) на территории РФ на основе временного ряда спутниковых данных MODIS за период 2001-2022 годов**

Растительный покров на территории страны непрерывно меняется под воздействием природных и антропогенных факторов. Например, известно, что вследствие забрасывания сельскохозяйственных земель с конца девяностых годов прошлого века, покрытая лесами площадь в районах центральной России увеличилась по разным оценкам примерно на 30-40 млн га. Кроме того, в связи с изменением климатических показателей, таких как повышение температуры и влажности, ряд статей подтверждает локальное распространение древесно-кустарниковой растительности в северных широтах. Недостаток и неполнота имеющихся данных, а также противоречивость некоторых экспертных оценок диктуют необходимость решения задачи оценки динамики границ распространения ДКР в пределах страны.

Оценка динамики площади и новых границ распространения ДКР проведена с помощью созданного ранее временного ряда карт лесистости территории за период с 2001 по 2022 г. (рисунок 2.4.2.1). Временной ряд построен на основе обработки ежедневных данных MODIS (пространственное разрешение 230 м), полученных в разные сезоны, с помощью алгоритма непараметрической регрессии «Случайный лес». В качестве опорных данных использовалась глобальная карта основных типов покрова WorldCover 2020 Европейского космического агентства (пространственное разрешение 10 м).



Рисунок 2.4.2.1 — Пример построенной по данным MODIS карты лесистости

Валидация полученных карт лесистости территории с помощью поведельной таксационной информации АЦО ГИЛ и данных ГЛР при сравнении как на уровне пикселей, так и на уровне лесничеств подтверждает достаточно высокую точность получаемых подпиксельных оценок площади ДКР (в пределах 10 % для MAE и 15 % для RMSE).



С помощью временного ряда карт в каждой рассматриваемой точке земной поверхности были рассчитаны линейные тренды, по которым оценена средняя скорость зарастания/обезлесивания территории, а также величина случайных колебаний оценок лесистости относительно ее прогнозируемых значений. В случае, когда изменение лесистости в крайние года рассматриваемого временного интервала укладывалось в пределы удвоенной величины случайных колебаний, изменение считалось неподтверждённым и удалялось из итоговой карты средних ежегодных приростов. В результате была построена карта изменений границ произрастания ДКР (рисунок 2.4.2.2).



Рисунок 2.4.2.2 — Карта изменения границ произрастания ДКР между 2001 и 2022 годом на основе оценки средних приростов ДКР в пикселе

На основании полученных данных были выделены две зоны наиболее активной экспансии ДКР: зона смешанных и широколиственных лесов Европейской части РФ и лесотундровая зона Восточной Сибири. Первая с высокой вероятностью связана с прекращением земледелия на сельскохозяйственных землях, вторая — с наиболее значительными климатическими изменениями на территории РФ (ростом среднегодовой температуры). С помощью построенной карты изменений ДКР вне границ лесного фонда, были получены оценки зарастания ДКР для территории, на которой не ведется учет лесов (рисунок 2.4.2.3).

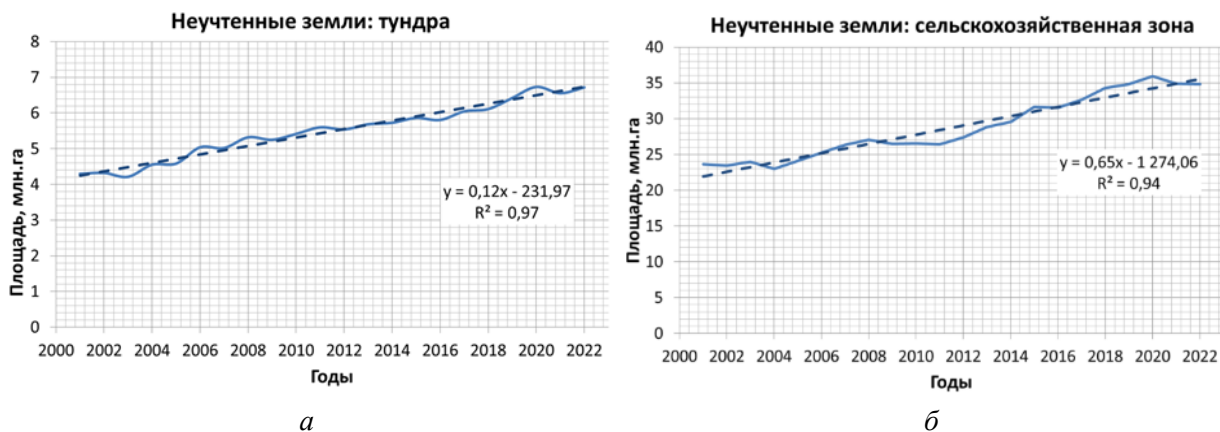


Рисунок 2.4.2.3 — Динамика площади, покрытой ДКР вне границ учета лесных земель: а — тундровая зона; б — зона земель с.-х. назначения

За рассматриваемый период площадь, покрытая ДКР, в зоне земель с/х назначения, где не ведется учет лесов, выросла на 11,3 млн га до 34,8 млн га. Средний прирост площади в год составил 650 тыс. га в год. В зоне тундры площадь ДКР выросла на 2,4 млн га и составила 6.72 млн га с средним приростом 120 тыс. га в год. В обеих зонах за рассматриваемый период наблюдался стабильный прирост покрытой ДКР площади, при этом в зоне земель с.-х. назначения зарастание ДКР происходит примерно в пять раз быстрее.

Анализ построенной карты изменений ДКР между 2001 и 2022 г. позволяет оценить произошло ли изменение на территориях, на которых была уже ДКР ранее или имеет место экспансия ДКР на новые территории. Таким образом, все произошедшие изменения были разделены на экстенсивные и интенсивные и получены оценки площади типов этих изменений для двух рассматриваемых выше зон неучтенных лесов. Из таблицы 2.4.2.1 следует, что для зарастания на Европейской части РФ более характерен интенсивный рост площади ДКР, связанных с продолжением зарастания территории с наличием ДКР. Данный факт объясняется тем, что процесс забрасывания сельскохозяйственных угодий начался существенно ранее момента начала наблюдения, а именно в конце 80–90-х гг. XX в. В лесотундровой зоне рост площади ДКР вызван как интенсивным ростом площади внутри рассматриваемого участка пикселя данных, так и экспансией ДКР на новые территории.

Таблица 2.4.2.1 — Динамика покрытой ДКР площади в период 2001–2022 гг.

Изменение площади ДКР	Сельскохозяйственные земли	Тундровая зона
Экстенсивное	+4,3 млн га	+1,5 млн га
	38 %	57,7 %
Интенсивное	+7 млн га	+1,1 млн га
	62 %	42,3 %

## 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 устойчивого развития.

При этом к числу наиболее значимых результатов, полученных в рамках данного направления, можно отнести:

- проведены исследования возможностей картографирования наземных экосистем России на основе данных прибора VIIRS;
- исследованы возможности дистанционной оценки сезонных и многолетних изменений площадей подвижных песков и дефлированных территорий для решения задач мониторинга опустынивания;

- получили развитие подходы к картографированию структурных характеристик пастбищной растительности с применением временных рядов спутниковых данных Sentinel-2 и MODIS;
- разработаны подходы к оценке чистой первичной продукции растительного покрова наземных экосистем России с использованием спутниковых данных ДЗЗ
- проведен сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных информационных продуктов, полученных по спутниковым данным ДЗЗ;
- проведено пространственное моделирование распределения открытых песков и дефлированных под влиянием антропогенных нагрузок территорий для мониторинга процессов опустынивания;
- проведено картографирование сорных понижений и солончаков на основе многолетних данных Landsat;
- осуществлен мониторинг влияния на наземные экосистемы катастрофических гидрологических событий на основе разновременных данных ДЗЗ;
- проведены исследования изменения границ произрастания древесно-кустарниковой растительности на территории РФ на основе временного ряда спутниковых данных MODIS за период 2001–2022 гг.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Биосфера» в 2023 г. выполнены в полном объеме.



## 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 2023–2025 гг. а именно:

- 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, для изучения климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Земли, а также крупномасштабных погодно-климатических колебаний типа муссонов, явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья;
- развитие методов дистанционной диагностики процессов, протекающих в криосфере Земли, в том числе исследование сезонной и многолетней динамики северной полярной шапки, анализ состояния пресноводных акваторий в период ледостава, определение характеристик замерзающих водно-болотных угодий для изучения климатических и экологических изменений арктических и субарктических территорий;
- Развитие методов и подходов мониторинга и прогноза крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений.

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2023 г. результаты также изложены в следующих публикациях [2, 3, 17, 18, 25, 32, 38, 47, 55, 56, 60, 71, 72, 85, 90, 92, 97, 100, 104, 109].

### **3.1 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, для изучения климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Земли, а также крупномасштабных погодно-климатических колебаний типа муссонов, явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья**

#### ***3.1.1 Исследование характеристик муссона близ Индии в поле интегрального влагосодержания атмосферы по данным спутниковых микроволновых радиометров***

Явление южноазиатского муссона, как климатического маятника, затрагивает большие районы тропической части Евразии и Индийского океана. Муссон существенно влияет на всю инфраструктуру сельского хозяйства и связанных с ним отраслей Индии и других близлежащих стран. Для лиц, связанных с производством сельскохозяйственной продукции, критически важно знать заранее сроки начала и конца муссонного периода. Задержка или раннее начало муссонного периода для данной местности приводит к колоссальным убыткам. Именно по этой причине проводятся многочисленные исследования муссонов с помощью различных средств дистанционного зондирования с целью прогнозирования развития муссона на как можно более длительный срок.

В последние десятилетия по мере создания чувствительных радиотепловых комплексов микроволнового зондирования, способных функционировать на КА в течение десятков лет (например, миссия DMSR), ситуация в корне изменилась. Появилась возможность по спутниковым данным радиотеплового зондирования Земли восстанавливать поля интегральных по высоте геофизических характеристик тропосферы. В исследованиях 2023 г. была рассмотрена динамика интегрального водяного пара в двух

районах близ Индийского полуострова: в Аравийском море и Бенгальском заливе с 2012 по 2021 г. и проанализированы временные характеристики муссонного периода.

В рамках работы была разработана методика восстановления интегрального паросодержания (PWV) над любым типом поверхности или по всему земному шару. Основой для восстановления PWV служат радиотепловые измерения приборов SSMIS на трёх спутниках DMSP: F16, F17 и F18. Приборы на этих спутниках выполняют наблюдения в близкое местное время. SSMIS имеет 24 радиометрических канала на частотах от 19 до 200 ГГц и конический тип сканирования под углом  $53^\circ$ .

Для восстановления PWV из радиотепловых измерений SSMIS был использован современный и актуальный подход с применением искусственных нейронных сетей (ИНС). Одной из проблем непосредственного использования данных SSMIS для анализа интегрального водяного пара является наличие лакун в спутниковых данных. Схема сканирования SSMIS даже с использованием нескольких спутников не позволяет получать полного суточного покрытия данными всего земного шара, из-за чего между областями измерений остаются существенные лакуны. Принципиальная возможность устранения лакун и восстановления интегральных по высоте атмосферы горизонтальных потоков водяного пара по данным спутникового радиотеплового мониторинга продемонстрирована в рамках подхода спутникового радиотепловидения.

Таким образом были получены ежесуточные поля водяного пара за 2012–2021 гг. по радиометрическим данным TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 каналов 1–18 с интервалом 3 ч на координатной сетке  $0,25 \times 0,25^\circ$ . Из этой базы данных для анализа полей водяного пара были выбраны два района у берегов Индии (рисунок 3.1.1). Район в Бенгальском заливе представляет собой квадрат  $3 \times 3^\circ$  с центром в точке  $20^\circ$  с.ш.  $87,5^\circ$  в.д., которая считается областью максимального содержания водяного пара в северной части Бенгальского залива. Вторая область выбрана такого же размера на той же широте в Аравийском море с центром в точке  $20^\circ$  с.ш.  $64,5^\circ$  в.д. Выбор районов исследования связан с желанием провести анализ влияния потоков водяного пара в Аравийском море и Бенгальском заливе, в районах, которые обеспечивают приток влаги в период муссона на территорию Индостана.

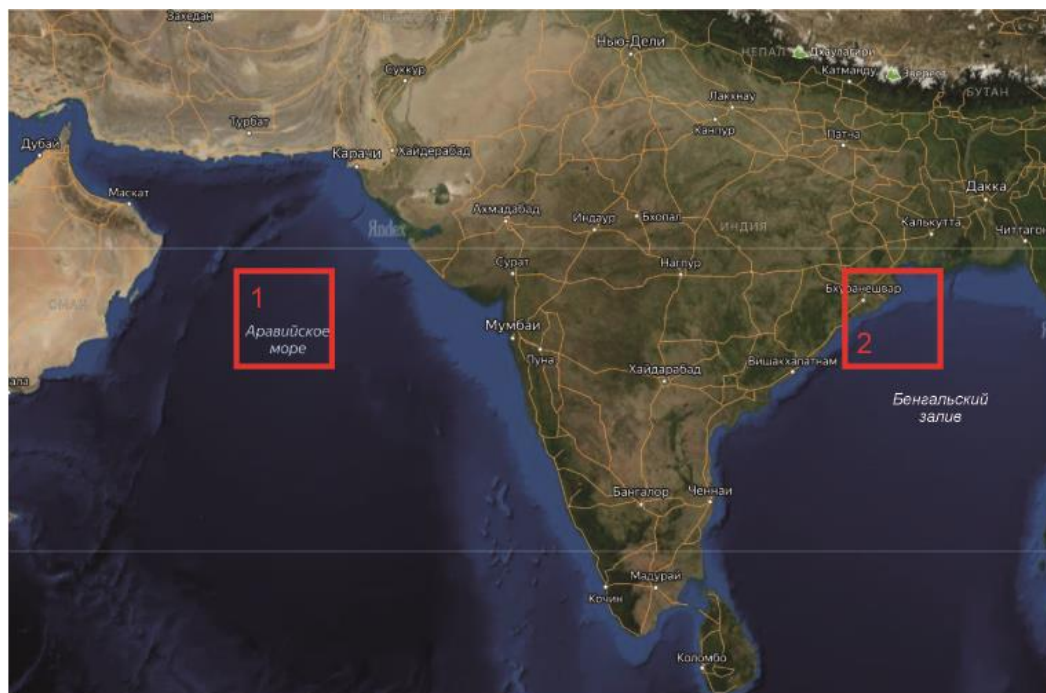


Рисунок 3.1.1 — Районы анализа полей водяного пара в Аравийском море (1 — квадрат  $3 \times 3^\circ$  с центром в точке  $20^\circ$  с.ш.,  $64,5^\circ$  в.д.) и в Бенгальском заливе (2 — квадрат  $3 \times 3^\circ$  с центром в точке  $20^\circ$  с.ш.,  $87,5^\circ$  в.д.)

Начало сезона муссонов связано со сдвигом внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) с экватора в северные широты примерно на  $20^\circ$ . Значение интегрального водяного пара PWV с января до апреля находится на уровне  $20\text{--}30 \text{ кг/м}^2$  как в Аравийском море, так и в Бенгальском заливе, затем к маю — июню возрастает до  $30\text{--}50 \text{ кг/м}^2$ , а к началу муссонного периода доходит до  $60 \text{ кг/м}^2$ . Если в Аравийском море рост PWV от года к году происходит с большими вариациями, то в Бенгальском заливе в каждом исследуемом сезоне возрастание PWV происходит относительно плавно со средним трендом  $0,33 \text{ кг/м}^2$  в сутки (от  $0,43 \text{ кг/м}^2$  в сутки в 2013 г до  $0,27 \text{ кг/м}^2$  в сутки в 2019 г.) и с началом муссона выходит на постоянное значение — «полку» со средним значением за все рассматриваемые годы  $62,18 \text{ кг/м}^2$ . Таким образом, переход от возрастания PWV к постоянной величине сигнализирует о начале муссонного периода.

Завершение периода муссона возникает в результате снижения PWV с постоянного уровня. Происходит это не так однозначно, как с началом муссона. Снижение PWV характеризуется сильными вариациями различными по годам, тем не менее это снижение определяет конец муссона.

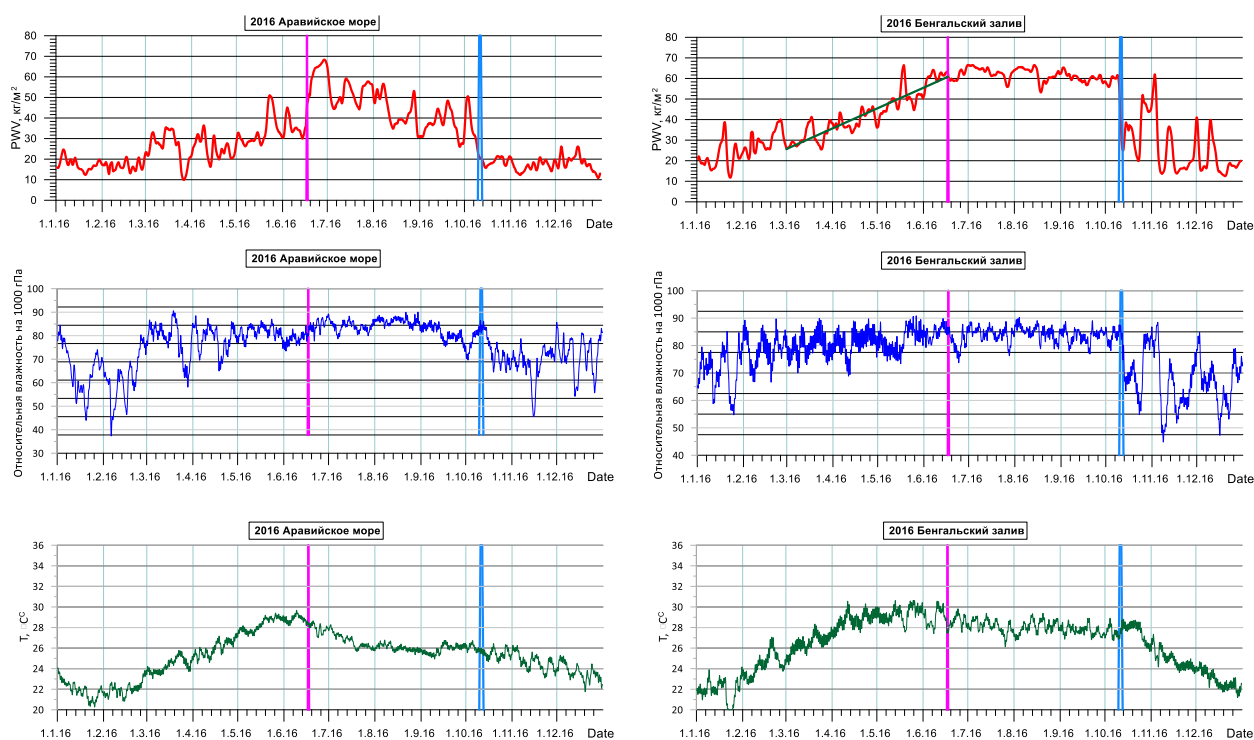


Рисунок 3.1.2 — Усреднённые значения интегрального водяного пара PWV на левой панели в районе Аравийского моря и на правой панели — Бенгальского залива начиная с 2016 г. (верхние рисунки). Средние и нижние рисунки — относительная влажность и температура атмосферы на уровне 1000 гПа, взятые из реанализа в этих же районах за тот же период. Вертикальные розовые линии обозначают начало периода муссона, голубые вертикальные линии — конец муссона. Зелёная линия показывает линейный тренд возрастания PWV в районе Бенгальского залива за период с 1 марта текущего года до момента начала муссона

На рисунке 3.1.2 представлены в качестве примера усреднённые значения интегрального водяного пара PWV (в  $\text{кг/м}^2$ ) в каждом выбранном районе Аравийского моря и Бенгальского залива начиная с 2016 г (верхние рисунки). В левой панели показаны данные для Аравийского моря (район 1 на рисунке 3.1.1), а в правой — данные для Бенгальского залива (район 2). Вертикальные розовые линии обозначают начало периода муссона. Голубые вертикальные линии — конец муссона. Зелёная сплошная линия показывает линейный тренд возрастания PWV в районе Бенгальского залива с 1 марта текущего года до момента начала муссона. Средние и нижние рисунки демонстрируют

относительную влажность и температуру атмосферы на уровне 1000 гПа, взятые из реанализа ERA5 в этих же районах за тот же период.

Анализ данных показал, что полигон в Бискайском заливе с центром в точке 20° с.ш. 87,5° в.д. является идеальным районом для исследования и диагностики процессов зарождения и окончания муссона в центральной Индии по данным полей интегрального водяного пара. В этом районе происходит относительно плавное возрастание PWV со средним трендом 0,33 кг/м<sup>2</sup> в сутки с начала марта и с началом муссона выходит на постоянную величину со средним значением за 2012–2021 гг. 62,18 кг/м<sup>2</sup>. Снижение величины PWV от среднего значения характеризует окончание периода муссона.

Исследование полей интегрального водяного пара PWV по микроволновым данным спутниковых радиометров может служить хорошим инструментом для исследования атмосферных процессов типа южноазиатского муссона как в глобальном, так и в региональном масштабах.

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

#### ***3.2.1 Разработка модели собственного микроволнового излучения устьевых областей арктических рек с учётом попадания в пиксель радиометра поверхности суши***

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

Дельты и эстуарии арктических рек представляют собой уникальные экосистемы, находящиеся в условиях сложного взаимодействия речных и морских факторов. Они характеризуются значительной изменчивостью и большой экологической уязвимостью. Однако при этом они обладают богатыми природными ресурсами, играющими важную роль в экономике прибрежных регионов. Пресная речная вода, смешиваясь с океанической, образует опреснённый поверхностный слой, который оказывает сильное влияние на циркуляцию верхнего слоя океана. Реки приносят в океан органические и неорганические вещества, влияя на биологическое и экологическое состояние заливов и морей Арктики. Устьевые области арктических рек подвержены очень сильным сезонным воздействиям с существенными колебаниями температуры, солнечной освещённости, ледяного покрова, накоплением воды в снегу, биогенной нагрузки и множеством других факторов, включая антропогенные и техногенные воздействия. Одним из важных моментов изучения солоноватых вод остаётся выяснение и уточнение зависимости различных процессов от величины солёности при смешении морских и пресных вод.

Оперативные спутниковые данные о гидрологическом режиме устьевых областей являются важнейшим источником информации для анализа различных природных и климатических процессов, а также оценки интенсивности и мощности антропогенной и техногенной нагрузки на прилегающие территории.

Спутник SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) Европейского космического агентства, был запущен в ноябре 2009 г. Спутник несёт единственную полезную нагрузку — MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), первый в истории космический интерферометрический радиометр L-диапазона. Первоначальные задачи спутника по измерению влажности почвы и солёности морской поверхности в дальнейшем были дополнены новыми приложениями, такими как измерение толщины и

динамики морского льда, определение состояния почвы при замерзании/оттаивании, анализ фенологических фаз замерзающих водных объектов, оценка гидрологических изменений устьевых областей и водно-болотных угодий и т.д.

Яркостная температура поверхности Земли  $T_{Br}$  с учётом поляризации измеряется микроволновым радиометром MIRAS в диапазоне углов визирования  $0-60^\circ$ . Радиометр принимает восходящее излучение на частоте 1,41 ГГц. Максимальный пространственный охват достигается при угле визирования  $42,5^\circ$ , при этом пространственное разрешение составляет величину  $35 \times 65$  км. Пересчёт значений  $T_{Br}$  из связанной с антенной системы координат ( $T_X$  и  $T_Y$ ) в систему координат, связанную с поверхностью Земли ( $T_H$  и  $T_V$ ) проводится по штатным алгоритмам SMOS с помощью пакета SMOS-BOX версии 5.8.1 в программной среде SNAP. Данные продукта SMOS L1C привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9. Линейный размер ячейки сетки составляет величину порядка 16 км, а площадь — около  $195 \text{ км}^2$ . Таким образом, значение яркостной температуры для любой ячейки сетки формируется участком подстилающей поверхности площадью от  $1780 \text{ км}^2$  (по уровню 3 дБ). Получается, что один пиксель радиометра MIRAS содержит в среднем порядка девяти ячеек геодезической сетки DGG ISEA 4N9. Сама же ячейка площадью  $195 \text{ км}^2$  расположена в центре этого участка (рисунок 3.2.1.1). Таким образом, если в пиксель радиометра будет попадать часть берега, этот факт необходимо учитывать при анализе сезонной динамики яркостной температуры устьевых областей.

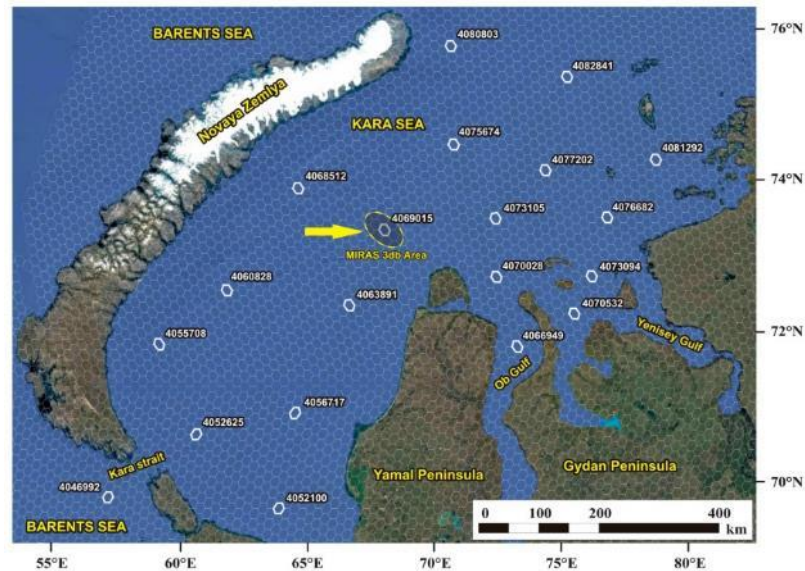


Рисунок 3.2.1.1 — Ячейки геодезической сетки DGG ISEA 4N9. Жёлтой стрелкой показан пиксель радиометра MIRAS по уровню 3 дБ (пунктирный жёлтый эллипс)

Яркостная температура поверхности Земли, измеряемая на орбите космическим радиометром, может быть определена из уравнения переноса излучения:

$$T_{Br}^{H,V} = T_{Surf}^{H,V} \exp(-\xi_\theta) + T_A + R_{Surf}^{H,V} T_A \exp(-\xi_\theta) + R_{Surf}^{H,V} T_{Cos} \exp(-2\xi_\theta), \quad (3.2.1.1)$$

где H и V — горизонтальная и вертикальная поляризация;  $T_{Surf}$  — яркостная температура поверхности;  $R_{Surf}$  — отражательная способность поверхности;  $T_A$  — яркостная температура атмосферы;  $t_{Cos}$  — яркостная температура космического излучения;  $\xi_\theta$  — интегральное поглощение в кислороде и водяном паре.

Если в пиксель радиометра MIRAS попадает поверхность двух типов, например, акватория и прибрежная территория (рисунок 3.2.1.2), то яркостную температуру на орбите Земли можно вычислить из следующего выражения:



$$T_{Br\ MIRAS}^{H,V} = kT_{Br\ Coast}^{H,V} + (1-k)T_{Br\ Cell}^{H,V}, \quad (3.2.1.2)$$

где  $k$  — относительная удельная площадь, занятая прибрежной территорией;  $T_{Br\ Coast}$  — яркостная температура прибрежной территории;  $T_{Br\ Cell}$  — яркостная температура центральной ячейки, полностью расположенной в акватории Е1 (см. рисунок 3.2.1.2). В свою очередь,  $T_{Br\ Coast}$  и  $T_{Br\ Cell}$  рассчитываются отдельно из выражения (3.2.1.1).



Рисунок 3.2.1.2 — Южная часть Енисейского залива. Пиксель радиометра MIRAS (жёлтый эллипс) с центральной ячейкой Е1 (красный шестиугольник)

Яркостную температуру прибрежной территории можно вычислить по формуле для собственного микроволнового излучения подстилающей поверхности:

$$T_{Br\ Coast}^{H,V} = \chi_{Coast}^{H,V} T, \quad (3.2.1.3)$$

где  $\chi_{Coast}$  — коэффициент излучения прибрежной территории;  $T$  — термодинамическая температура поверхности.

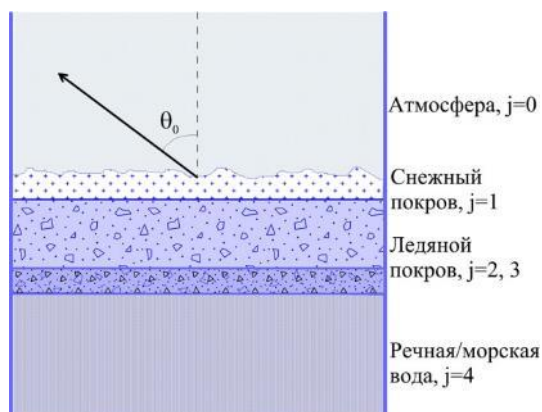


Рисунок 3.2.1.3 — Модельное представление излучающей системы «речная/морская вода — влажный ледяной покров — ледяной покров — снежный покров — атмосфера»

Для анализа сезонных вариаций яркостной температуры устьевых областей и заливов была использована модель излучения слоисто-неоднородной неизотермической среды, разработанная ранее в ИКИ РАН. Модель была адаптирована для случая излучающей системы «речная/морская вода — ледяной покров (два слоя) — снежный покров — атмосфера».

В период ледостава излучающей системой являлась многослойная среда, представляющая собой водную поверхность (пресную или морскую), над которой

расположен тонкий слой влажного льда (из-за контакта с водой), над ним слой льда (влажный или сухой, в зависимости от температурных условий), покрытый снегом, а над ними — толстый слой атмосферы (см. рисунок 3.2.1.3). В зависимости от гидрологического режима моделируемой области ледяной покров может быть как пресноводным, так и морским. Яркостная температура поверхности, в соответствии с таким модельным представлением, определяется из следующих выражений:

$$T_{Surf}^V = \sum_{j=1}^3 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \left[ \begin{aligned} & (1 - \exp(-2 \operatorname{Im} \psi_j)) \cdot \left(1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2\right) + \\ & + 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_j}{\operatorname{Re} \psi_j} \operatorname{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_j)) \cdot \left( \frac{|k_{z_j}|^2 - k_x^2}{|k_j|^2} \right) \end{aligned} \right] \times \\ \times \frac{\operatorname{Re} Z_j}{\operatorname{Re} Z_0} + T_4 |W_4|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_4}{\operatorname{Re} Z_0}, \quad (3.2.1.4)$$

$$T_{Surf}^H = \sum_{j=1}^3 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \left[ \begin{aligned} & (1 - \exp(-2 \operatorname{Im} \psi_j)) \cdot \left(1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2\right) + \\ & + 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_j}{\operatorname{Re} \psi_j} \operatorname{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_j)) \end{aligned} \right] \times \\ \times \frac{\operatorname{Re} Z_j}{\operatorname{Re} Z_0} + T_4 |W_4|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_4}{\operatorname{Re} Z_0},$$

где индекс  $j$  обозначает слои среды, слой подстилающей поверхности ( $j=4$ ) имеет полубесконечную толщину;  $k_j$  — волновой вектор в слое  $j$ ;  $T_j$  — термодинамическая температура слоя  $j$ ;  $r_j^+$ ,  $r_j^-$  — коэффициенты отражения от верхней и нижней границы слоя  $j$ , соответственно;  $\psi_j$  — набег фазы волны поперёк слоя  $j$ ;  $W_j$  — коэффициенты пропускания от внутренней стороны верхней граница слоя  $j$  на границу «снег – атмосфера»;  $Z_j$  — волновой импеданс слоя  $j$ . Характеристики каждого слоя вычисляются из формул:

$$W_j = \prod_{m=1}^j \frac{Z_{m-1}^{in+} + Z_{m-1}}{Z_{m-1}^{in+} + Z_m} \exp(i\psi_{m-1}), \quad Z_j^{in+} = Z_j \frac{Z_{j-1}^{in+} - iZ_j \operatorname{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j-1}^{in+} \operatorname{tg} \psi_j}, \quad Z_j^{in-} = Z_j \frac{Z_{j+1}^{in-} - iZ_j \operatorname{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j+1}^{in-} \operatorname{tg} \psi_j},$$

$$\psi_j = k_{z_j} h_j, \quad k_{z_j} = k_j \cos \theta_j, \quad k_x = k_0 \sin \theta_0, \quad k_j = \frac{2\pi \sqrt{\varepsilon_j}}{\lambda}, \quad \cos \theta_j = \sqrt{\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_0 \sin^2 \theta_0}{\varepsilon_j}}, \quad (3.2.1.5)$$

$$r_j^+ = \frac{Z_{j-1}^{in+} - Z_j}{Z_{j-1}^{in+} + Z_j}, \quad r_j^- = \frac{Z_{j+1}^{in-} - Z_j}{Z_{j+1}^{in-} + Z_j}, \quad Z_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_j} \cos \theta_j} & \text{– горизонтальная поляризация,} \\ \frac{\cos \theta_j}{\sqrt{\varepsilon_j}} & \text{– вертикальная поляризация,} \end{cases}$$

где  $Z_j^{in+}$  — входной импеданс в слое  $j$  на нижней границе для волны, распространяющейся вверх;  $Z_j^{in-}$  — входной импеданс в слое  $j$  на верхней границе для волны, распространяющейся вниз;  $h_j$  — толщина слоя  $j$ ;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $\theta_0$  — угол наблюдения (см. рисунок 3.2.1.3);  $\varepsilon_j$  — комплексная диэлектрическая проницаемость слоя  $j$ . Таким образом, собственное излучение всей системы определяется термодинамической температурой и комплексной диэлектрической проницаемостью каждого слоя.

Комплексная диэлектрическая проницаемость слоёв (льда и снега) определялась по квазиволновой модели эффективной диэлектрической проницаемости дисперсной среды, которая была разработана авторами данного отчёта. Согласно модели, снежный покров представляется воздушной средой, содержащей сферические ледяные зерна, покрытые плёнкой воды, и капли воды; речной лёд — сплошной пресноводный лёд, содержащий сферические включения воздуха и воды; морской лёд — сплошной пресноводный лёд, содержащий сферические включения воздуха и рассола (рисунок 3.2.1.4).

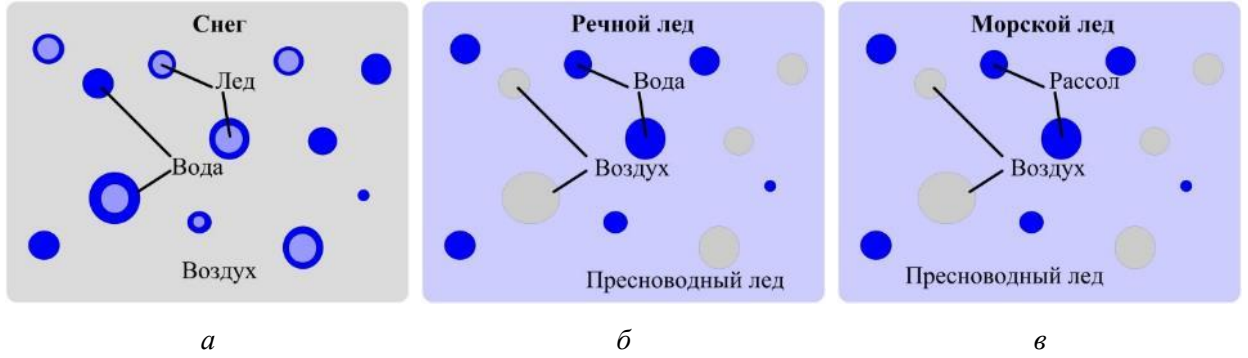


Рисунок 3.2.1.4 — Модельное представление снега (а), речного (б) и морского (в) льда

Эффективная диэлектрическая проницаемость, согласно таким модельным представлениям, определяется из выражений следующего вида:

для снега —

$$\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{снег}} = \varepsilon_{\text{возд}} \left[ 1 - \frac{4\pi n_{\text{лёд}} (\varepsilon_{\text{лёд}}^{\text{вод}} + 2\varepsilon_{\text{возд}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{лёд}}}{k^2}}{2\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{снег}} + \varepsilon_{\text{лёд}}^{\text{вод}}} - \frac{4\pi n_{\text{вод}} (\varepsilon_{\text{вод}} + 2\varepsilon_{\text{п. лёд}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{вод}}}{k^2}}{2\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{снег}} + \varepsilon_{\text{вод}}} \right]^{-1}, \quad (3.2.1.6)$$

для речного льда —

$$\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{р. лёд}} = \varepsilon_{\text{п. лёд}} \left[ 1 - \frac{4\pi n_{\text{возд}} (\varepsilon_{\text{возд}} + 2\varepsilon_{\text{п. лёд}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{возд}}}{k^2}}{2\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{р. лёд}} + \varepsilon_{\text{возд}}} - \frac{4\pi n_{\text{вод}} (\varepsilon_{\text{вод}} + 2\varepsilon_{\text{п. лёд}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{вод}}}{k^2}}{2\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{р. лёд}} + \varepsilon_{\text{вод}}} \right]^{-1}, \quad (3.2.1.7)$$

для морского льда —

$$\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{м. лёд}} = \varepsilon_{\text{п. лёд}} \left[ 1 - \frac{4\pi n_{\text{возд}} (\varepsilon_{\text{возд}} + 2\varepsilon_{\text{п. лёд}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{возд}}}{k^2}}{2\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{м. лёд}} + \varepsilon_{\text{возд}}} - \frac{4\pi n_{\text{рас}} (\varepsilon_{\text{рас}} + 2\varepsilon_{\text{п. лёд}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{рас}}}{k^2}}{2\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{м. лёд}} + \varepsilon_{\text{рас}}} \right]^{-1}, \quad (3.2.1.8)$$

где  $k$  — волновое число;  $n_{\text{лёд}}$ ,  $n_{\text{вод}}$ ,  $n_{\text{возд}}$  и  $n_{\text{рас}}$  — концентрации ледяных зёрен, капель воды, частиц воздуха и капель рассола, соответственно;  $\varepsilon_{\text{лёд}}^{\text{вод}}$  — эффективное значение диэлектрической проницаемости ледяной частицы, покрытой оболочкой воды;  $\varepsilon_{\text{вод}}$ ,  $\varepsilon_{\text{возд}}$ ,  $\varepsilon_{\text{п. лёд}}$  и  $\varepsilon_{\text{рас}}$  — диэлектрическая проницаемость воды, воздуха, пресноводного льда и рассола, соответственно;  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{лёд}}$ ,  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{вод}}$ ,  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{возд}}$  и  $\langle f_{\omega} \rangle_{\text{рас}}$  — усреднённые по размерам частиц, амплитуды рассеяния вперёд ледяной частицы с оболочкой воды, капли воды,

частицы воздуха и капли росы, соответственно. Амплитуды рассеяния вперёд, рассчитываются по теории Ми. Предполагалось, что размеры всех включений подчинены логарифмически-нормальному распределению.

В период открытой воды излучающей системой была поверхность воды (пресная или солёная). В этом случае на рисунке 3.2.1.3 исчезают слои 1, 2 и 3, а в выражениях для  $T_{Surf}$  (3.2.1.4) остаётся только последнее слагаемое, которое соответствует формуле (3.2.1.3) для собственного микроволнового излучения подстилающей поверхности.

Разработанные модельные представления использовались для анализа сезонной и межгодовой динамики яркостной температуры различных областей Енисейского залива. В заливе было выбрано 12 ячеек продукта SMOS L1C (рисунок 3.2.1.5), по которым получены данные по яркостной температуре за период 2012–2020 гг.

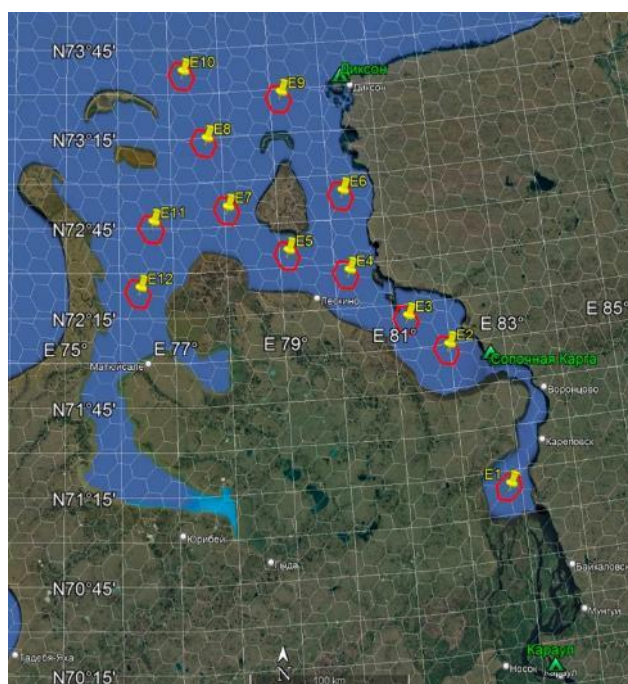


Рисунок 3.2.1.5 — Енисейский залив. Красные шестиугольники — анализируемые ячейки продукта SMOS L1C

Несмотря на то, что каждая выбранная ячейка продукта SMOS L1C полностью совпадает с акваторией залива (рисунок 3.2.1.5), в пиксель радиометра MIRAS в некоторых случаях попадает прибрежная территория.

В результате синтеза апертуры радиометра MIRAS и сопутствующих вычислительных преобразований на значение яркостной температуры ячейки оказывает влияние излучение участков поверхности, удалённых от центра ячейки на сотню километров, но с несравненно меньшим весом, чем в центре. Условно принято считать границей диаграммы направленности антенны (ДНА) по уровню 3 дБ, величины осей эллипсов на поверхности. Они приводятся в продуктах SMOS L1C. Ориентация эллипсов меняется от витка к витку, поэтому для любой близкой к берегу ячейки в каждом конкретном измерении содержится разная доля сигнала от суши. Даже при постоянных характеристиках поверхности воды и суши, измеряемые радиометром значения  $T_{Br}$ , в такой ячейке будут показывать «колебательную динамику». Таким образом, для каждой конкретной ячейки Енисейского залива ситуация разная. Нами была выполнена оценка минимальной и максимальной доли площади суши в конусе ДНА по уровню 3 дБ при различных возможных ориентациях проекции ДНА на поверхности в каждой ячейке. Результаты этой оценки представлены в таблице 3.2.1.1.

Таблица 3.2.1.1 — Оценка удельной площади суши в каждой ячейке продукта SMOS L1C

Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3 дБ	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23

Для расчёта яркостной температуры прибрежной территории по формуле (3.2.1.3) необходимо знать коэффициент излучения подстилающей поверхности и его сезонные изменения. На территории в районе Енисейского залива преобладают мохово-лишайниковые и кустарниковые тундры. В связи с этим для определения значений  $\chi_{Coast}$  были использованы результаты, полученные в ходе лабораторных экспериментов и описанные в работе (Романов А.Н., Хвостов И.В., Уланов П.Н., Ковалевская Н.М., Кириллов В.В., Плуталова Т.Г., Кобелев В.О., Печкин А.С., Синуцкий А.И., Сысоева Т.Г., Хворова Л.А. Космический мониторинг арктических и субарктических территорий Ямало-Ненецкого автономного округа. Барнаул: ООО «Пять плюс», 2018. 120 с). На рисунке 3.2.1.6 представлены температурные зависимости коэффициента излучения для живого и отмершего ягеля, который является одним из самых распространённых растений в рассматриваемом регионе.

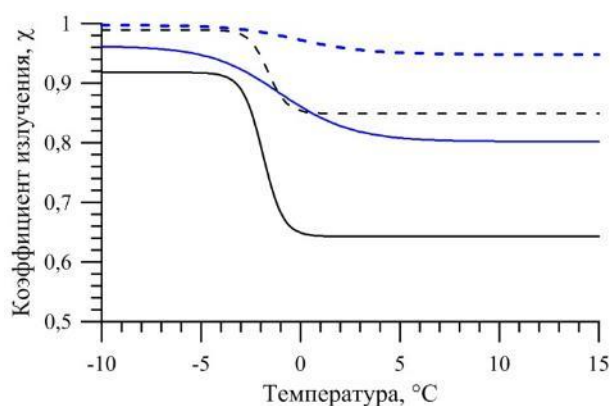


Рисунок 3.2.1.6 — Зависимость коэффициента излучения живого (синий цвет) и отмершего (чёрный цвет) ягеля от температуры. Сплошная линия — горизонтальная поляризация, пунктирная линия — вертикальная поляризация

Кроме того, при расчётах были использованы известные данные по температурным зависимостям коэффициента излучения снежного покрова, болот, карликовой растительности и т.п.

На рисунке 3.2.1.7 представлено сравнение модельных расчётов яркостной температуры на горизонтальной и вертикальной поляризации со спутниковыми данными для участка E1. Расчёт выполнен для двух случаев: при  $k=0$  (без учёта берега) и при  $k=0,44$  — с учётом попадания в пиксель береговой зоны. Выбранное значение  $k=0,44$  соответствует данным, представленным в таблице 3.2.1.1. Модельный расчёт выполнен



для солёности воды подо льдом равной 0 ‰, что соответствует реальным гидрологическим условиям данной области.

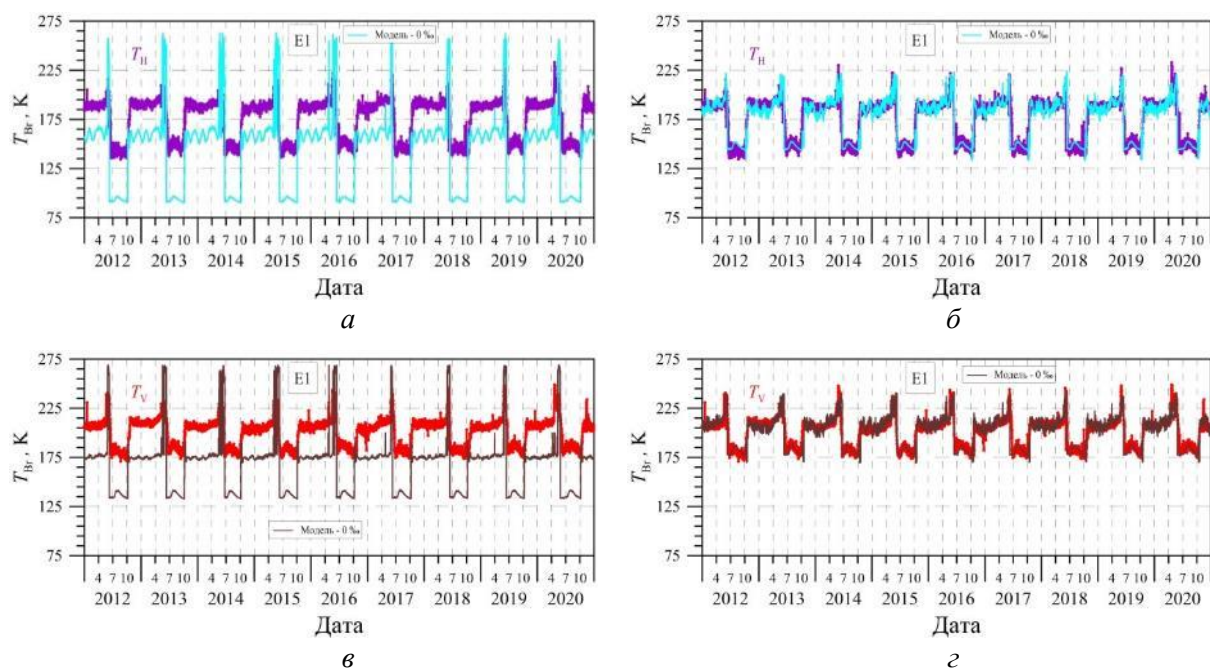


Рисунок 3.2.1.7 — Динамика  $T_{Br}$  на горизонтальной  $T_H$  (а, б) и вертикальной  $T_V$  (в, г) поляризации для участка E1: а, в — без учёта попадания в пиксель береговой зоны; б, г — с учётом попадания в пиксель береговой зоны. Расчёт выполнялся для удельной площади береговой зоны  $k=0,44$  и солёности воды подо льдом 0 ‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчёт

Представленный рисунок хорошо демонстрирует необходимость учёта берега, попадающего в пиксель радиометра, при модельных расчётах яркостной температуры исследуемых участков. Особенно это заметно для летнего периода, когда сходит снежный и ледяной покров — величины яркостной температуры открытой водной поверхности и поверхности берега (тундровая растительность, открытая почва, болота) сильно различаются между собой. В зимний период различие в значениях коэффициента излучения мхов, лишайников, замёрзшей поверхности земли, покрытой снежным покровом, и ледяного покрова акватории значительно меньше.

На рисунках 3.2.1.8–3.2.1.10 представлены результаты расчёта ещё для трёх выбранных ячеек в Енисейском заливе (E2, E5 и E11). Для участка E2 (рисунок 3.2.1.8) расчёт выполнялся при  $k=0,1$ , что соответствует значениям таблицы 3.2.1.1. Для данного участка вычисления проводились при двух значениях солёности под ледяным покровом: 5 и 15 ‰. В данной области, в районе мыса Сопочная Карга (см. рисунок 3.2.1.5), в зимний период находится зона смешения пресных и солёных вод. Поэтому солёность в этой области подо льдом очень нестабильна от сезона к сезону и определяется величиной зимнего стока Енисея и динамикой вод Карского моря. Модельные расчёты это хорошо подтверждают. Например, в зимний период 2014/2015 гг. солёность воды подо льдом была 5 ‰, а в зимний период 2012/2013 гг. — практически всё время 15 ‰.

Ячейки E5 и E11 находятся в области, которая подвержена сильному влиянию вод Карского моря. Здесь солёность воды подо льдом находится в районе 22–27 ‰, что хорошо подтверждается модельным расчётом, выполненным для солёности воды 25 ‰. Пиксель ячейки E5 может захватывать, согласно таблице 3.2.1.1, от 7 до 40 % береговой зоны. Модельный расчёт динамики  $T_{Br}$  для ячейки E5 был выполнен при  $k=0,2$  (рисунок 3.2.1.9). Ячейка E11 расположена далеко от берега (см. рисунок 3.2.1.5), и он уже не влияет на изменение яркостной температуры ячейки. Расчёт для этой области был

выполнен при  $k = 0$  (рисунок 3.2.1.10). Из рисунка видно, что модельный расчёт хорошо соответствует данным продукта SMOS L1C.

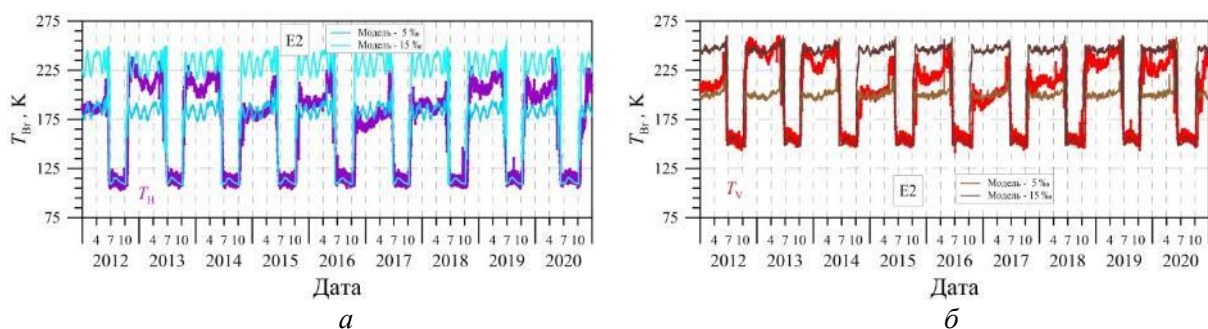


Рисунок 3.2.1.8 — Динамика  $T_{Br}$  на горизонтальной  $T_H$  (а) и вертикальной  $T_V$  (б) поляризации для участка E2. Расчёт выполнялся для удельной площади береговой зоны  $k=0.1$  и солёности воды подо льдом 5 ‰ и 15 ‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчёт

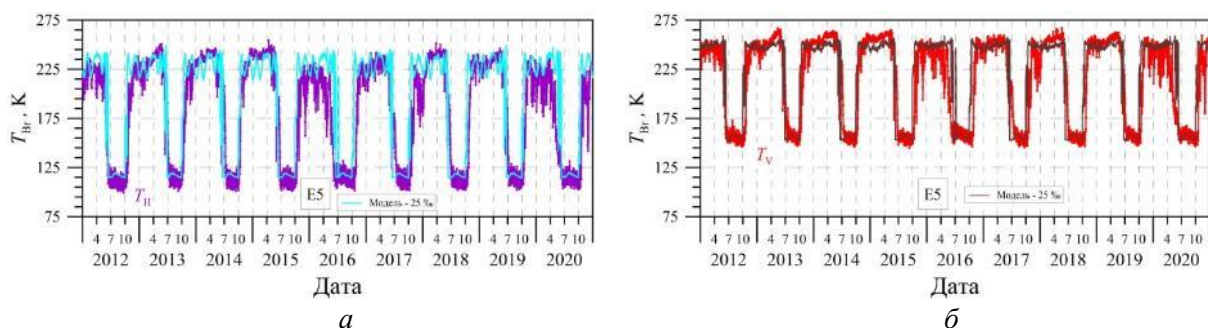


Рисунок 3.2.1.9 — Динамика  $T_{Br}$  на горизонтальной  $T_H$  (а) и вертикальной  $T_V$  (б) поляризации для участка E5. Расчёт выполнялся для удельной площади береговой зоны  $k = 0,2$  и солёности воды подо льдом 25 ‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчёт

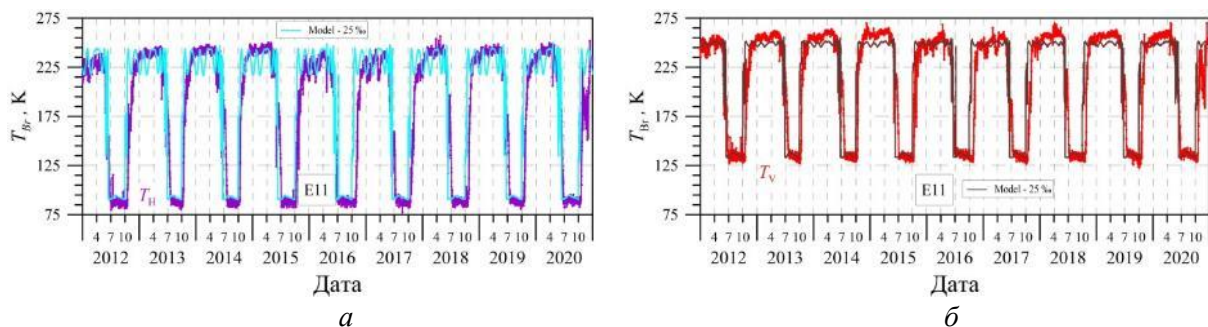


Рисунок 3.2.1.10 — Динамика  $T_{Br}$  на горизонтальной  $T_H$  (а) и вертикальной  $T_V$  (б) поляризации для участка E11. Расчёт выполнялся для удельной площади береговой зоны  $k = 0$  и солёности воды подо льдом 25 ‰. Фиолетовый и красный цвет — данные продукта SMOS L1C, голубой и коричневый цвет — модельный расчёт

Проведённые исследования показали, что разработанная модель может быть с успехом использована для интерпретации данных спутниковой микроволновой радиометрии прибрежных территорий арктических морей и устьевых областей арктических рек. Полученные результаты могут быть использованы для оценки гидрологического режима прибрежных акваторий Арктики в зимнее время, а также климатических изменений прилегающих территорий по данным спутниковой микроволновой радиометрии.

### ***3.2.2 Анализ использования данных космической радиолокационной съёмки при решении задачи автоматизации ледового картирования***

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

Согласно плану развития Северного морского пути (СМП), утверждённому Правительством РФ, ожидается, что с декабря 2024 г. каботажные перевозки из портов Северо-Запада России на Дальний Восток и в обратном направлении станут проводиться регулярно. Ожидается значительный рост объёма грузопотока. Планируется проведение мероприятий по развитию СМП как конкурентоспособной международной транспортной коммуникации. Для достижения заявленных целей требуется развитие различной инфраструктуры: транспортной, береговой, телекоммуникационной и т.д. Кроме этого, необходимо проведение работ по модернизации системы специализированного гидрометеорологического обеспечения (СГМО) для эффективного и безопасного судоходства во льдах. Новые требования, предъявляемые к системе СГМО, предполагается выполнить, в частности, за счёт внедрения автоматизированных технологий, в число которых входят алгоритмы классификации ледяного покрова по космическим снимкам.

В рамках оперативного СГМО судоводителям предоставляется информация об ожидаемых ледовых условиях на маршрутах следования. Одним из основных видов информации являются ледовые карты. Ледовые карты представляют собой результат анализа данных дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ), получаемых в различных спектральных диапазонах. Они включают в себя изображения в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах, а также снимки микроволнового диапазона, получаемые с помощью радиометров и радаров с синтезированной апертурой (РСА). Данные видимого и ИК-диапазонов имеют существенные ограничения, связанные с длительным периодом полярной ночи в Арктике, а также частым наличием плотного облачного покрова. Данные микроволновых радиометров не зависят от условий естественной освещённости и гораздо менее чувствительны к атмосферной влаге (облачности, туманам и др.), однако их применение для нужд оперативного СГМО ограничено низким пространственным разрешением. Данные РСА не зависят от погодных условий и освещённости и, кроме того, имеют высокое пространственное разрешение, что делает их приоритетным, а в некоторых случаях и единственным источником информации о ледяном покрове Арктики. Однако наряду с очевидными преимуществами радиолокационные данные имеют ряд особенностей, пренебрежение которыми при использовании автоматических методов, может приводить к серьёзным ошибкам анализа и, следовательно, планирования морских операций.

Факторы, влияющие на формирование радиолокационных изображений (РЛИ) морского льда, условно можно разделить на две группы, первая из которых включает в себя некоторые технические характеристики радиолокационной системы, проводящей съёмку, а вторая состоит из комплекса физико-химических свойств ледяного покрова, как объекта зондирования.

К числу технических характеристик РСА, влияющих на отображение ледяного покрова, относятся: рабочий диапазон длин волн и поляризация зондирующего сигнала, а также угол визирования.

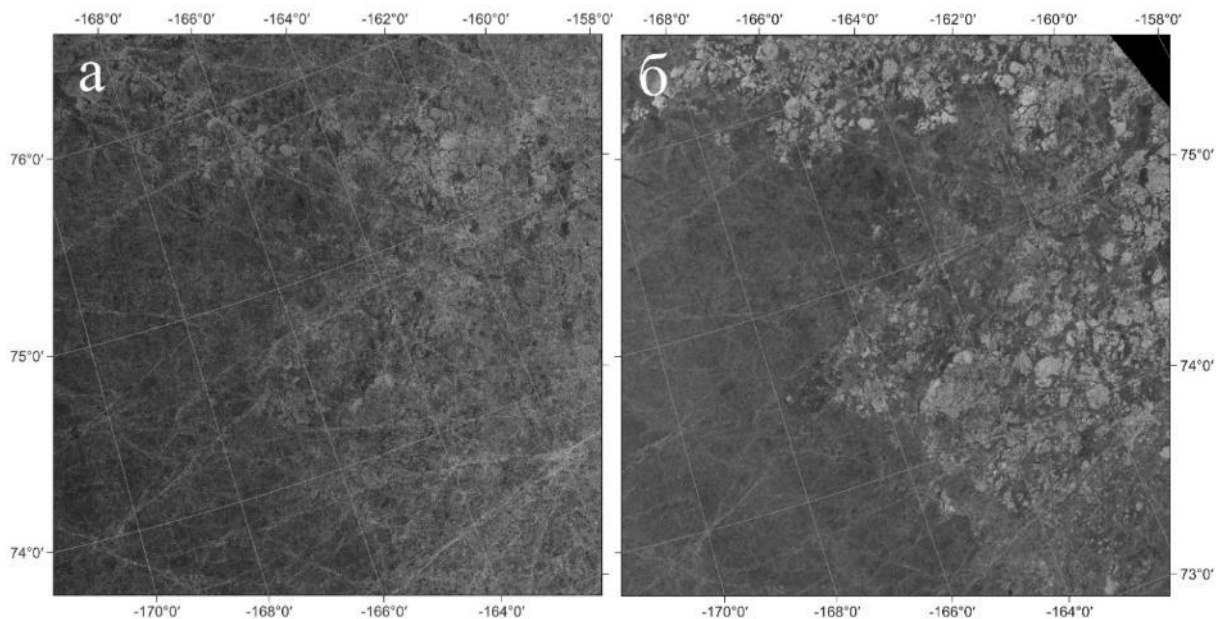


Рисунок 3.2.2.1 — Пример квазисинхронных РЛИ, полученных в различных диапазонах длин волн. Район Арктического бассейна к северу от Чукотского моря: *а* — РЛИ космического аппарата (КА) ALOS-1 за 23 апреля 2007 г. (L-диапазон) (<https://search.asf.alaska.edu>); *б* — РЛИ КА ENVISAT за 23 апреля 2007 г. (С-диапазон) (<http://seaice.dk/>). Изображения получены на согласованной ГГ-поляризации

### 3.2.2.1 — Длина волны зондирующего сигнала

Длиной волны определяется способность сигнала проникать вглубь ледяной толщи, а также его чувствительность к объектам малой величины, таким как мелкомасштабные шероховатости поверхности и включения в ледовом объёме (пузырьки воздуха, вмёрзшие частицы грунта и т.п.). При увеличении длины волны возрастает проникающая способность сигнала. При этом если длина волны соизмерима, например, с размером воздушных включений в объёме многолетнего льда, сигнал оказывается чувствительным к таким неоднородностям. Это обуславливает высокие значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) и, соответственно, яркий тон льда на РЛИ. Если длина волны значительно превышает размер включений в объёме, сигнал оказывается к ним нечувствительным, и высоких значений УЭПР не отмечается. Сравнение двух РЛИ, полученных в L- (1–2 ГГц) и С- (4–8 ГГц) диапазонах показано на рисунке 3.2.2.1. На РЛИ С-диапазона (рисунок 3.2.2.1 б) хорошо виден контраст между полями многолетнего льда, имеющими яркий тон, и зонами однолетнего льда, которые отображены тёмным тоном. На РЛИ L-диапазона (рисунок 3.2.2.1а) такого контраста не наблюдается.

### 3.2.2.2 — Поляризация зондирующего сигнала

В общем случае ровные поверхности льда имеют бóльшие значения УЭПР на согласованной вертикальной (ВВ) поляризации, по сравнению с согласованной горизонтальной (ГГ) поляризацией. Отражённые сигналы на ВВ- и ГГ-поляризации имеют схожие значения для многих типов льда. Гряды торосов лучше идентифицируются на ГГ-, чем ВВ-поляризациях за счёт большего радиолокационного контраста между ровным и торосистым льдами. Интенсивность отражённого сигнала на перекрёстной (ГВ) поляризации, как правило, значительно меньше, чем на ВВ- и ГГ-поляризациях. Пример РЛИ, полученного на двух поляризациях (ГГ+ГВ), приведён на рисунке 3.2.2.2.



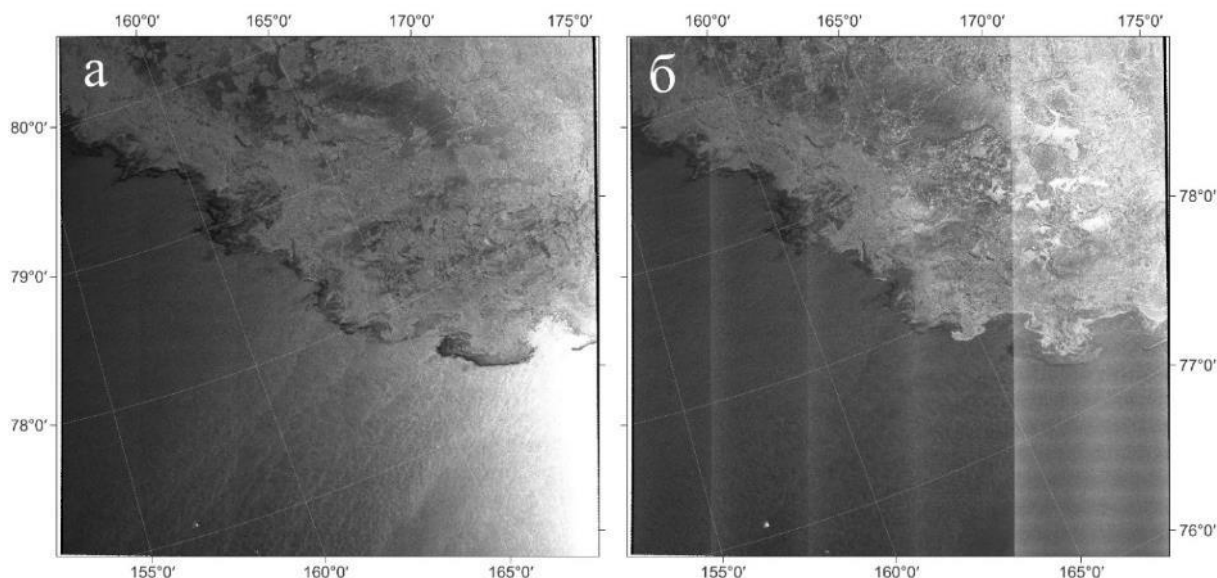


Рисунок 3.2.2.2 — Пример РЛИ КА Sentinel-1В (С-диапазон) за 12 октября 2019 г., полученного в режиме двойной поляризации. Район Арктического бассейна к северу от Восточно-Сибирского моря (<https://scihub.copernicus.eu/>): *а* — РЛИ, полученное на ГГ-поляризации. Видна засветка восточной границы изображения и затемнение западной; *б* — РЛИ, полученное на ГВ-поляризации. Хорошо видны полосы теплового шума

### 3.2.2.3 — Угол визирования

При измерениях на ГГ-поляризации УЭПР подстилающей поверхности сильно зависит от угла визирования (угол отклонения зондирующего луча от надира), который непостоянен поперёк полосы съёмки. На результирующих РЛИ этот эффект проявляется в виде градиентного изменения общей тональности снимка. Так, на рисунке 3.2.2.2*а* видна засветка восточного края РЛИ, который в момент съёмки располагался ближе к спутнику. Западный край РЛИ, расположенный дальше от спутника, наоборот, выглядит затемнённым. УЭПР и, соответственно, тон одного и того же типа льда может значительно меняться в пределах одного изображения. Режим ГВ-поляризации также чувствителен к изменениям угла визирования и, кроме того, на получаемых РЛИ может проявляться тепловой шум в виде полос, направленных по оси движения спутника (см. рисунок 3.2.2.2*б*). Подобные вариации тона могут ошибочно восприниматься как изменения УЭПР подстилающей поверхности. Применение автоматических алгоритмов классификации к спутниковым РЛИ требует предварительного устранения описанных эффектов.

Рассмотрим физико-химические свойства морского льда, влияющие на формирование РЛИ ледяного покрова. УЭПР льда — характеристика обратного рассеяния его поверхности. Обратное рассеяние складывается из объёмного и поверхностного. Преобладание одного вида рассеяния над другим определяется глубиной проникновения сигнала в толщу льда, что, в свою очередь, зависит от его диэлектрических свойств. Диэлектрические свойства льда описываются комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП), действительная часть которой отвечает за скорость распространения волны в среде, а мнимая часть характеризует диссипативные потери, т.е. поглощение электромагнитной энергии в среде. Диэлектрические свойства морского льда зависят от его солёности, температуры, фазового состава (т.е. соотношения объёмов непосредственно льда, жидкой воды и воздуха в толще), текстуры (т.е. количества, формы и особенностей распределения воздушных и солевых включений), а также длины волны зондирующего сигнала. С увеличением солёности льда возрастает мнимая часть КДП и, соответственно, потери энергии в объёме льда.



У многолетнего льда, который является практически пресным, при отрицательной температуре (жидкая фаза отсутствует) мнимая часть КДП имеет низкое значение. Зондирующий сигнал может проникать в такой лёд на большую глубину без существенных потерь. В объёме многолетнего льда имеются включения, такие как пузырьки воздуха и дренажные каналы, образовавшиеся при стоке рассола. Для сигнала, длина волны которого сопоставима с размером этих включений, каждое из них является рассеивающим элементом. Это обуславливает большую долю объёмного рассеяния и высокие значения УЭПР у многолетних льдов при использовании, например, С-диапазона длин волн. Соответственно, на результирующих РЛИ многолетний лёд имеет очень яркий тон, за счёт чего обычно легко дешифрируется (рисунок 3.2.2.1 б).

Однолетние и молодые льды имеют большую солёность (от 2–3 до 22–25 ‰) и, соответственно, большую мнимую часть КДП. Зондирующий сигнал проникает в толщу этих льдов на гораздо меньшую глубину (в зависимости от солёности). В объёме льда при этом возрастают потери энергии за счёт поглощения. Преобладающим в данном случае является зеркальное отражение сигнала от поверхности. Этим обуславливаются низкие значения УЭПР и, соответственно, тёмный тон льда на получаемых РЛИ. Однако ситуация изменяется, когда на поверхности однолетнего и молодого льда появляются неровности различного масштаба, начиная с размеров, сопоставимых с длиной волны зондирования. В этом случае обратное рассеяние формируется преимущественно за счёт угловых отражателей на поверхности льда («валики» по краям блинчатого льда, солевые цветы), либо за счёт нагромождений случайным образом ориентированных площадок (торосы, тёртый лёд). В обоих случаях будут наблюдаться высокие значения УЭПР и яркий тон льда на РЛИ, например, Х- (8–12 ГГц) или С-диапазона. Это обусловлено большим обратным рассеянием на шероховатой поверхности.

#### 3.2.2.4 — Солёность и температура льда

Радиоволны Ку- (12–18 ГГц) и Х-диапазонов могут проникать в пресный сухой лёд на глубину до 10 м, а в солёный морской лёд — всего на 0,1 м. Радиосигнал с частотами от 1 до 12 ГГц (Х-, С-, S- и L-диапазоны), проникает в опреснённый сухой многолетний лёд на 30–500 см, а в более солёный однолетний — на 5–100 см. Волны Х-диапазона распространяются в приповерхностном слое льда толщиной 5–80 см, а волны L-диапазона — в слое 40–500 см, в зависимости от типа льда, его солёности и температуры. Зависимость распространения радиоволн от температуры такова, что её уменьшение способствует большему проникновению сигнала вглубь ледяной толщи, и наоборот, что объясняется появлением или исчезновением жидкой фазы во льду.

#### 3.2.2.5 — Текстура льда

Текстура льда, которая также влияет на распространение сигнала, может быть самой разнообразной. Количество включений во льду, их форма и характер распределения во многом зависят от условий формирования этого льда на начальном этапе. Очень низкая температура воздуха, штормовой ветер, а также формирование льда из твёрдых атмосферных осадков, выпавших на морскую поверхность, способствуют захвату в объём льда большего количества солевых и воздушных включений. В течение года текстура льда постепенно меняется в результате процессов метаморфизма (зимой — преобразование снежного покрова в лёд, миграция солевых включений; летом — сток талой воды). Общее количество включений во льду иногда может достигать 50 % от общего объёма льда.

#### 3.2.2.6 — Шероховатость поверхности льда

В связи с тем, что степень шероховатости и её характерный пространственный масштаб в природе могут быть самыми разнообразными (от ~1 см до ~10 м), диапазон значений УЭПР молодых и однолетних льдов также может быть очень широким.

Шероховатость может создаваться блинчатыми льдами, солевыми цветами на поверхности ниласа, наслоениями молодых льдов, грядами торосов различного масштаба, тёртыми льдами. Такое разнообразие форм шероховатости молодого и однолетнего льда обуславливает очень широкий спектр возможных вариантов их отображения на спутниковых РЛИ. В некоторых случаях лёд одной и той же возрастной градации может отображаться совершенно по-разному в пределах одного моря или даже отдельной его части (губы, залива и т.п.).

### 3.2.2.7 — Заснеженность льда

Однолетние льды, покрытые слоем снега, имеют несколько бóльшие значения УЭПР, чем льды, не имеющего снега на поверхности, при использовании, например, Ку- и X-диапазонов радиоволн. Также свежевывапавший снег на поверхности молодого и однолетнего тонкого льда способен впитывать рассол из приповерхностного слоя ледяной толщи, в результате чего между снегом и льдом формируется вязкий слой снежур, насыщенный солью. Этот эффект несколько снижает значения УЭПР льдов. Кроме того, сухой снежный покров способен сглаживать эффект мелких шероховатостей на поверхности льда в С-, X-, Ку- и более коротковолновых диапазонах. Крупнозернистый сухой снег сокращает глубину проникновения сигнала С- и X-диапазонов — до десятков и единиц сантиметров, соответственно. Связано это с увеличением эффектов рассеяния сигнала на структурных неоднородностях снежной среды.

### 3.2.2.8 — Влагосодержание снега и льда

С наступлением сезона таяния в объёме снега возрастает количество жидкой воды, которая стекает вниз и скапливается на поверхности льда. В объёме снега содержание влаги обычно не превышает 12–15 % в период активного таяния. Даже небольшого количества влаги (5–6 %) достаточно, чтобы кардинальным образом изменить характер взаимодействия радиосигнала со снежно-ледяной толщей. Наличие влаги резко сокращает глубину проникновения сигнала так, что обратное рассеяние начинает формироваться в большей степени не льдом, а снегом на его поверхности. Даже в случае прохождения сквозь снежный покров сигнал встречает на своём пути слой талой воды, скопившейся на поверхности льда под снегом. Поскольку радиосигнал зеркально отражается от поверхности воды взаимодействия непосредственно со льдом так и не происходит. Поэтому в летнее время все типы льда на получаемых РЛИ отображаются одинаково, и разделение льда по возрастным градациям невозможно.

Из вышесказанного видно, что природа взаимодействия радиосигнала с морским льдом чрезвычайно сложна. При этом взаимодействие происходит не со всей ледяной толщей, а лишь с её поверхностью и некоторым приповерхностным слоем. Следовательно, УЭПР льда и его отображение на спутниковых РЛИ являются функцией не толщины льда, а ряда физико-химических параметров слоя снежно-ледяного покрова. Пространственно-временное распределение этих параметров в пределах анализируемой акватории может быть крайне неоднородным, и вклад каждого из них в результирующую УЭПР не известен. Неоднородность распределения параметров приводит к тому, что отображение льда одной и той же возрастной градации может сильно отличаться в разных районах акватории, и наоборот, отображение льдов разных возрастов может совпадать. Это существенно усложняет задачу классификации ледяного покрова по данным радиолокационной съёмки. Подобные неоднозначности частично позволяют избежать использования различных поляризаций излучаемого и принимаемого сигналов, однако полностью проблему это не решает.

Для наглядной иллюстрации обозначенных выводов рассмотрим РЛИ морского льда в районе архипелага Северная Земля (см. рисунки 3.2.2.3в и г). Согласно ледовой карте, составленной специалистами ААНИИ (см. рисунок 3.2.2.3б), в зонах, обозначенных цифрами 1, 2 и 3, преобладает остаточный лёд, переживший один сезон таяния и

вступивший в новый цикл ледообразования. Несмотря на принадлежность к одному классу, на представленных РЛИ как согласованной (ГГ), так и перекрёстной (ГВ) поляризации эти льды отображаются по-разному. На обоих РЛИ остаточный лёд в зоне 1 имеет схожее отображение с молодым, преимущественно серо-белым льдом в зоне 5. В зимние месяцы таким же образом могут отображаться и однолетние льды. Также схожее отображение имеют остаточный лёд в зоне 3 и молодой лёд в зоне 4. ИК-изображение (см. рисунок 3.2.2.3а), полученное за ту же дату, показывает, что возраст льда к востоку и западу от архипелага принципиально отличается, это видно в областях, свободных от облачности.

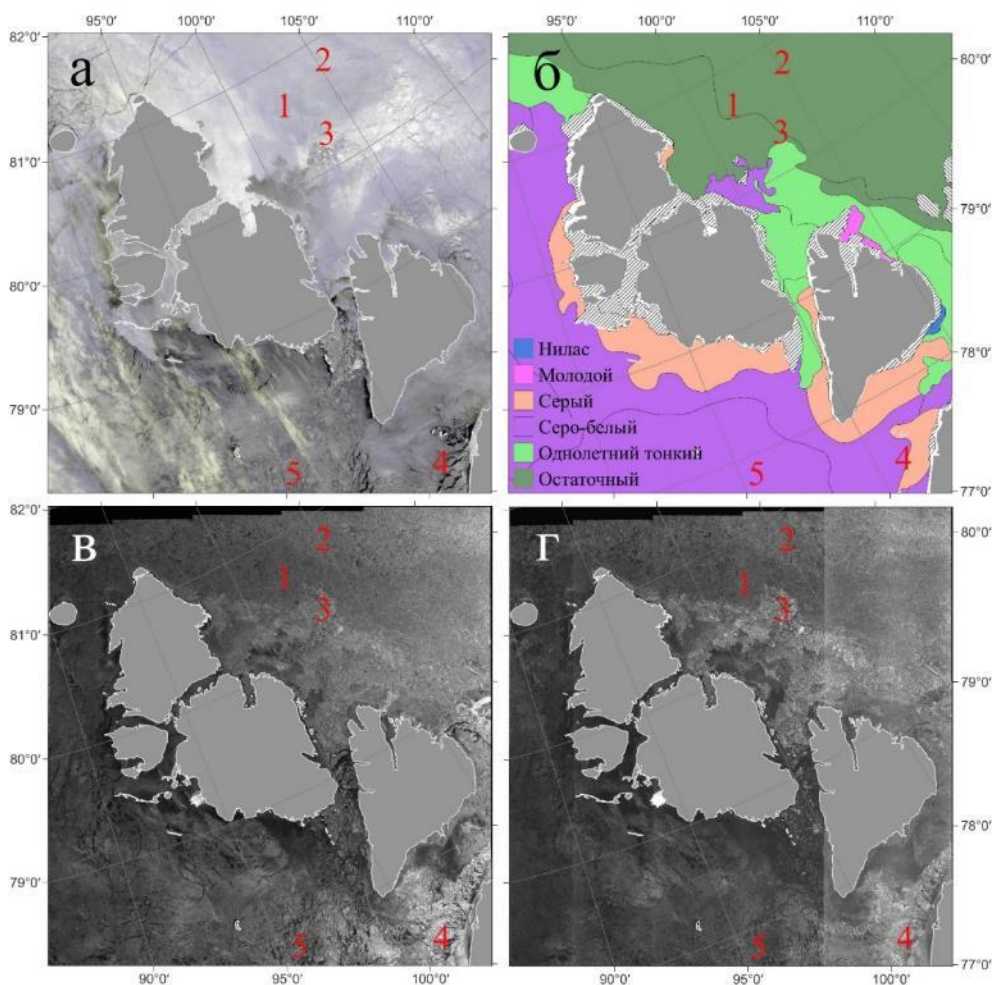


Рисунок 3.2.2.3 — Сопоставление радиолокационного и ИК-изображений с результатом экспертного анализа спутниковых снимков морского льда. Район архипелага Северная Земля: *а* — изображение КА Suomi-NPP/VIIRS в ИК-диапазоне за 5 ноября 2022 г. (принято на антенну ААНИИ); *б* — фрагмент ледовой карты ААНИИ по району Карского моря и моря Лаптевых за 6–8 ноября 2022 г.; *в* — РЛИ КА Sentinel-1A за 5 ноября 2022 г., полученное на ГГ-поляризации; *г* — РЛИ КА Sentinel-1A за 5 ноября 2022 г., полученное на ГВ-поляризации (<https://scihub.copernicus.eu/>)

Представленный обзор научной литературы позволяет заключить, что сложность автоматизации анализа РЛИ заключается в неоднозначностях классификации, возникающих из-за большого числа факторов, каждый из которых вносит свой вклад в результирующую УЭПР льда. Среди этих факторов — солёность льда, количество и размер неровностей на его поверхности, текстура ледяной толщи, влагосодержание, морфология снега и др. Совокупное влияние всех факторов в различных сочетаниях

приводит к тому, что разные типы льда могут иметь схожее отображение, и наоборот, один и тот же тип льда может отображаться по-разному в пределах акватории. Для достоверного определения типов льда необходимо использование всех доступных видов информации (изображений оптических и микроволновых радиометров, а также наземных наблюдений) и их комплексный анализ, формализация которого — весьма сложная задача. В этих обстоятельствах экспертный контроль должен оставаться неотъемлемой частью производственной цепочки СГМО для обеспечения качества выпускаемой информационной продукции. Оптимальным представляется совмещение автоматизированных технологий и экспертного анализа с ведущей ролью эксперта.

### **3.3 Развитие методов и подходов мониторинга и прогноза крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений**

#### ***3.3.1 Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе комплексных данных различных спутниковых систем***

Шивелуч — наиболее активный вулкан Камчатки, расположен в северной части Центральной Камчатской депрессии, в 50 км от п. Ключи и в 450 км от г. Петропавловск-Камчатский (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volc?name=Sheveluch>). Шивелуч — одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки: поперечник его основания достигает 45—50 км, площадь не менее 1300 км<sup>2</sup>.

Детальное описание пароксизмального эксплозивного извержения вулкана Шивелуч и распространения его пепловых и аэрозольных облаков было выполнено на основании изучения данных различных спутниковых систем (Himawari-9, NOAA-18/19, GOES-18, Terra, Aqua, JPSS-1, Suomi NPP, «Арктика-М» № 1 и др.) в ИС VolSatView.

Согласно данным со спутника Himawari-9 из ИС VolSatView, в 10:10 UTC 10 апреля появилось аэрозольное облако размером 12×30 км, поднявшееся до 6 км над уровнем моря (н.у.м.) и переместившееся к 10:50 UTC на 35 км на северо-северо-запад (азимут 354°) от вулкана. С 12:10 UTC 10 апреля из вулкана начался вынос некоторого количества пепла: на северо-запад (азимут 309°) от него стал протягиваться парогазовый с содержанием пепла шлейф, к 13:00 UTC достигший 40 км.

В 13:10 UTC 10 апреля началось пароксизмальное эксплозивное извержение влк. Шивелуч, сильно разрушившее лавовый купол в его кратере. На снимке со спутника Himawari-9 из ИС VolSatView, в 13:20 UTC было обнаружено пепловое облако размером 35×20 км с «шапкой» аэрозолей, дальняя кромка которого находилась на северо-востоке (азимут 15°) от вулкана (рисунок 3.3.1.1а). В дальнейшем эруптивное облако было развёрнуто и стало перемещаться на запад-северо-запад от вулкана (см. рисунок 3.3.1.1). По данным спутника Himawari-9 за 13:20 UTC 10 апреля в ИС VolSatView, эруптивное облако поднялось примерно до 10 км н.у.м. Токио VAAC определил высоту этого пеплового облака на 13:10 UTC 15,8 км н.у.м. ([https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/TextData/2023/20230410\\_30027000\\_0192\\_Text.html](https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/TextData/2023/20230410_30027000_0192_Text.html)). KVERT выпустил предупреждение об опасности извержения влк. Шивелуч для авиации (VONA — Volcano Observatory Notice for Aviation) с изменением авиационного цветового кода с оранжевого на красный в 19:29 UTC 10 апреля (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2023-51>).

Эсплозивное извержение продолжалось почти непрерывно в течение 10–13 апреля, мощный циклон, во власти которого находился весь полуостров Камчатка, вытягивал пепловое облако на запад, поворачивал его на юг, растягивал на север и направлял на восток от вулкана. Динамика развития пепловых и аэрозольных облаков этого извержения отражена на анимационных картинах, выполненных по серии снимков спутника Himawari-9 в ИС VolSatView с 12:30 UTC 10 апреля до 23:50 UTC 12 апреля (<http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru/animation/1681439690.gif>), и спутника «Арктика-М»

№ 1 с 16:00 до 21:30 UTC 10 апреля  
(<http://moscow.planeta.smislab.ru/animation/1681556486.webm>).

Наряду с непрерывным выносом пепла из кратера вулкана и образованием расширяющегося эруптивного облака, высота которого была преимущественно ограничена тропопаузой (~10 км н.у.м.), время от времени происходили мощные эксплозии, пеплы которых поступали в стратосферу. Например, по данным со спутника Himawari-9, такие эксплозии отмечены в 15:10 UTC (площадь облака  $S = 110 \text{ км}^2$ ), 15:30 UTC ( $S = 826 \text{ км}^2$ ), 16:50 UTC ( $S = 430 \text{ км}^2$ ), 17:50 UTC ( $975 \text{ км}^2$ ), 19:00 UTC ( $82 \text{ км}^2$ ), 19:20 UTC ( $177 \text{ км}^2$ ) 10 апреля. Например, сравнение данных приборов MODIS (спутник Aqua) в 14:50 UTC и АНІ (спутник Himawari-9) в 15:10 UTC позволило получить предварительную оценку высоты эксплозии порядка 15–16 км.

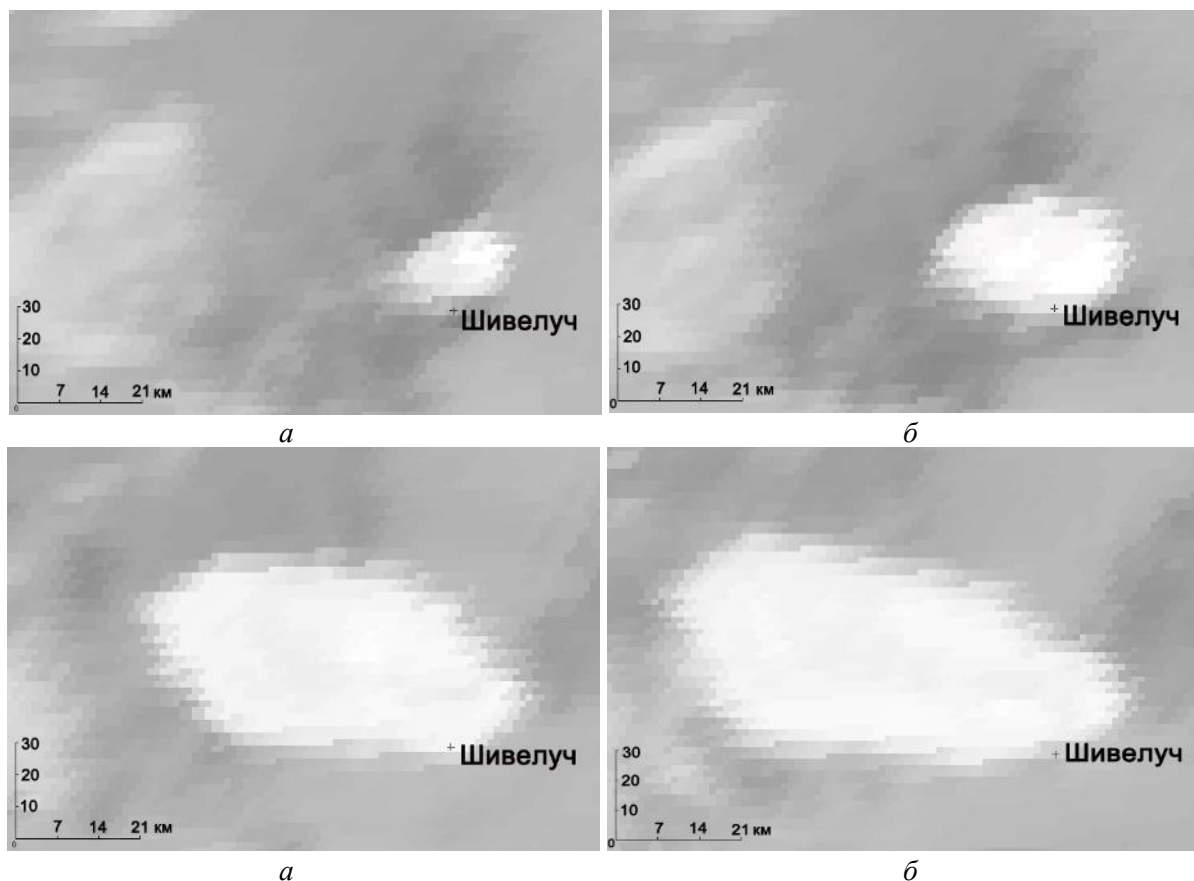


Рисунок 3.3.1 — Изменение конфигурации и азимута распространения эруптивного облака влк. Шивелуч во время извержения 10 апреля 2023 г. Данные из ИС VolSatView: изображения облака на снимках спутника Himawari-9 в 14-м канале в 13:20 (а), 13:30 (б), 14:00 (в), 14:20 UTC (г) 10 апреля 2023 г.

С 16:50 UTC 10 апреля в результате серии мощных эксплозий эруптивное облако стало расширяться, плотный пепловый шлейф был развернут на юг от вулкана. Например, в 19:00 UTC произошла очередная мощная эксплозия пепла, высота которой, согласно совместному предварительному анализу спутниковых данных «Арктика-М» № 1 (<http://moscow.planeta.smislab.ru/animation/1682090840.webm>) и Himawari-9 (<http://volcanoes.smislab.ru/animation/1681247449.webm>), превысила 13 км н.у.м. Оценка высоты этой эксплозии, выполненная по данным спутника GOES-18 по методике из работы (Horvath et al., 2021), показала ~18 км н.у.м. Предыдущие, эта и следующие мощные эксплозии привели к формированию плотного пеплового шлейфа, направленного на юго-запад от вулкана, пепел из которого отложился в пос. Ключи и окрестностях слоем около 8 см. В течение 10–13 апреля пепловые шлейфы вулкана меняли направления согласно развитию циклона в районе Камчатки. Территории, на которых отмечались такие



шлейфы и облака, имели примерную площадь: 10 апреля — 172 тыс. км<sup>2</sup>; 11 апреля — более 942 тыс. км<sup>2</sup>, в том числе 205 тыс. км<sup>2</sup> на п-ве Камчатка; 12 апреля — до 2115 тыс. км<sup>2</sup>.

На спутниковом снимке Sentinel-2A за 00:40 UTC 12 апреля наблюдается пепловый шлейф, протянувшийся от влк. Шивелуч на юго-запад (рисунок 3.3.1.2). На снимке также ярко выражена зона, покрытая значительным слоем пепла в течение извержения 10–11 апреля. Площадь этой зоны по первым, грубым оценкам составила более 60 тыс. км<sup>2</sup>. Общая площадь территории Камчатки и Тихого океана, на которой отмечались пепловые и аэрозольные шлейфы и облака в течение извержения Шивелуча 10–13 апреля, по состоянию на 14 апреля составляла около 3280 тыс. км<sup>2</sup>.

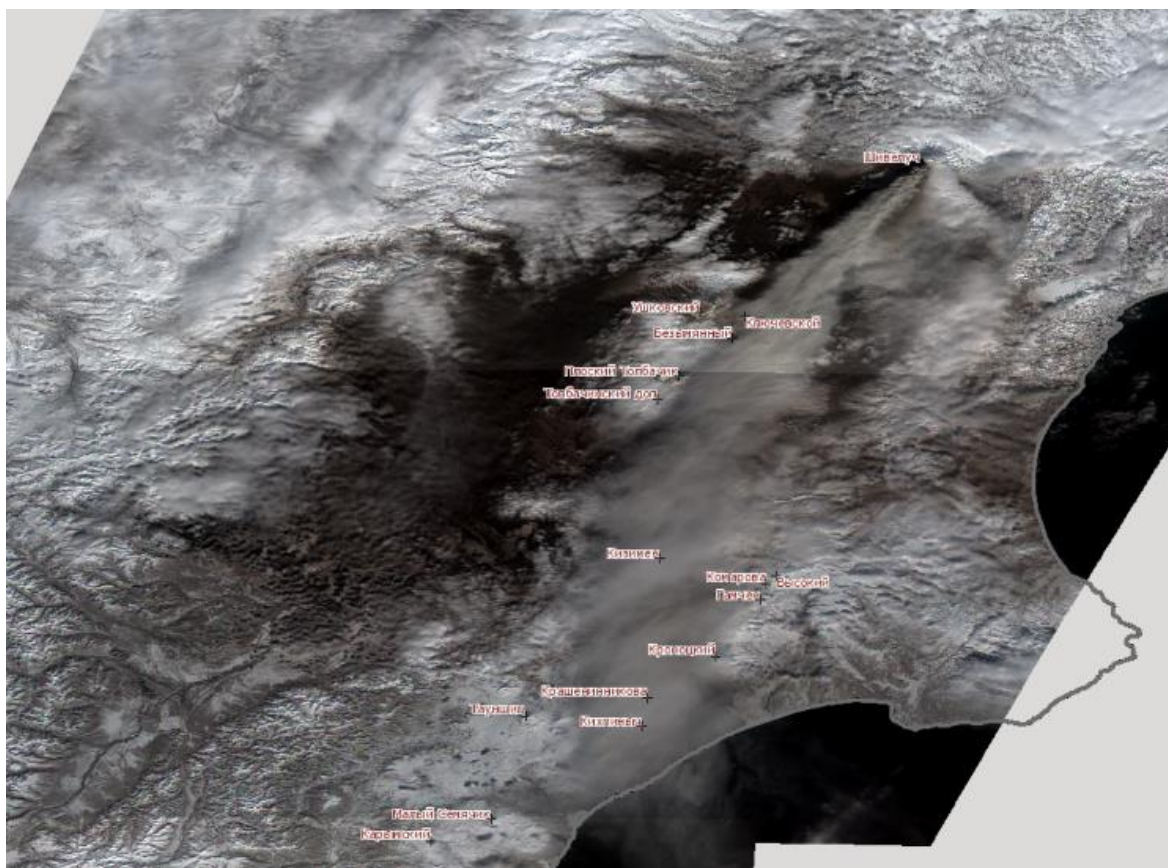


Рисунок 3.3.1.2 — Мощный пепловый шлейф вулкана Шивелуч и зона загрязнения, связанная с пеплопадами, на спутниковом снимке Sentinel-2A по состоянию на 00:41 UTC 12 апреля 2023 года

Следует отметить, что эруптивная колонна во время извержения не была вертикальной: например, в начальный момент извержения 10 апреля в 13:20 UTC она отклонялась на северо-северо-восток, в этот же день в 19:00 UTC — на северо-восток, 11 апреля в 12:00 UTC — на северо-запад; 12 апреля в 07:00 UTC — на юго-запад.

В течение всего извержения эксплозивные события сопровождалось выносом большого количества диоксида серы (SO<sub>2</sub>). Согласно данным Системы оповещения о вулканическом пепле и SO<sub>2</sub> Службы поддержки авиации (*англ.* Support Aviation Control Service (SACS) SO<sub>2</sub> and Ash Notification System, <http://sacs.aeronomie.be>), с помощью инструмента TROPOMI (*англ.* Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument), над Камчаткой были зарегистрированы облака диоксида серы, высота которых превышала 20 км н.у.м. Например, по состоянию на 01:42 UTC 11 апреля такие облака занимали площадь 165 967 км<sup>2</sup>, масса SO<sub>2</sub> в них составляла 214,46 кт, концентрация диоксида серы достигала 471,9 DU; на 01:22 UTC 12 апреля площадью таких облаков равнялась 593 156 км<sup>2</sup>, масса SO<sub>2</sub> в них — 243,765 кт, концентрация диоксида серы — 191,6 DU (рисунок 3.1.1.3).

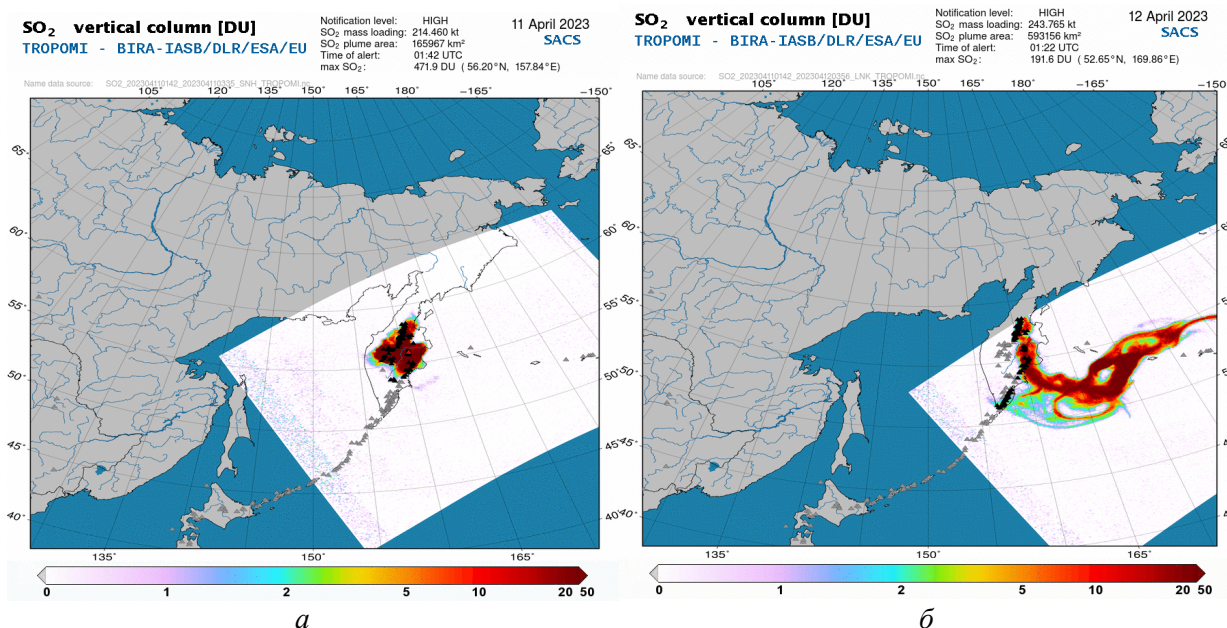


Рисунок 3.3.1.3 — Содержание  $\text{SO}_2$  в аэрозольном шлейфе влк. Шивелуч во время извержения 11 апреля (а) и 12 апреля (б) 2023 г. по данным SACS (<http://sacs.aeronomie.be/>)

К 20 апреля аэрозольное облако достигло западной части о. Гренландия ([https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/20/tropomi\\_vcd20230420\\_105\\_lr.gif](https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/20/tropomi_vcd20230420_105_lr.gif)), 21 апреля оно полосой протянулось от о. Исландия вдоль Скандинавского полуострова ([https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/21/tropomi\\_vcd20230421\\_106\\_lr.gif](https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/21/tropomi_vcd20230421_106_lr.gif)).

Данное эруптивное событие Шивелуча было одним из самых сильных эксплозивных извержений, связанных с ростом лавового купола в кратере вулкана с 1980 г. По предварительной оценке, для этого извержения VEI (*англ.* Volcanic Explosivity Index) оценивается как 3–4.

Работа выполнена с использованием ИС VolSatView (<http://volcanoes.smislab.ru>), совместно с Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Вычислительный центр, ДВО РАН и Дальневосточный центр «НИЦ «Планета».

### ***3.3.2 Оценка возможности построение подходов объективной оценки горимости лесов в регионах с различными условиями на примере предварительного анализа горимости лесов Российской Федерации в пожароопасном сезоне 2023 года по данным дистанционного мониторинга***

Охрана лесов от пожаров — наиболее важная и самая затратная часть мероприятий по сохранению лесов. Немало важным вопрос для планирования охраны лесов является достаточно оперативное получение оперативной информации об их горимости, в том числе о интегральной за весь пожароопасный сезон. Это необходимо, в том числе, для своевременной оценки итогов работы лесопожарных служб и планирования работ на последующие пожароопасные сезоны.

В настоящем разделе работе приводятся первые результаты оценки горимости лесов по пожароопасном сезоне 2023 г. на территории Российской Федерации. В работе обсуждаются некоторые метеорологические особенности сезона. Приводятся оценки интегральные площади лесов, пройденных огнём, и проводится их сравнения с площадями, пройденными пожарам за последние 11 лет. В проведённой работе предпринята попытка использовать количественные критерии, для объективной оценки горимости в различных регионах, которые позволили бы сравнить ситуации, складывающиеся в регионах с различными лесорастительными условиями. Для этого в работе анализировалась относительная горимость в разрезе регионов (отношение пройденной огнём площадь к площади лесов), которая сравнивалась с средними данными



за 11 лет, а также с данным предыдущего 2022 г. Для получения информации о площадях пройденных огнём используется однородный ряд данных наблюдений полученных на основе данных прибора MODIS и метод оценки площадей пройденных огнём разработанный в ИКИ РАН.

С точки зрения условий погоды пожароопасный сезон 2023 г. начался в среднем на 11 дней позже среднемноголетних значений (рисунок 3.3.2.1).



Рисунок 3.3.2.1 — Анализ начала пожароопасного сезона

Позднее начало сезона наблюдалось в большинстве субъектов Российской Федерации, преимущественно многолесных. Так, например, в Чукотском автономном округе позже на 26 дней, Магаданская область — 23, Архангельская область — 21, Камчатский край — 19, Иркутская область — 18, Республика Коми — 18, Республика Саха (Якутия) — 18, Красноярский край — 17, Республика Бурятия — 14, Республика Карелия — на 14 дней.

Раньше срока сезон начался в основном в регионах европейской части, например в Республике Татарстан — на 18 дней, Ульяновская область — 18, Самарская область — 17, Саратовская область — 16, Чувашская Республика — 15, Орловская область — 15, Тамбовская область — 14, Оренбургская область — 13, Пензенская область — 13, Республика Башкортостан — на 12 дней.

По состоянию на 10.10.2023 по анализируемым данным в лесах было зарегистрировано 11,7 тыс. пожаров, что на 38 % меньше среднемноголетних значений (2012–2022) и на 5 % больше данных прошлого года. Покрытая лесом площадь, пройденная огнем, составила 4,6 млн га, что на 38 % меньше среднемноголетних значений и на 52 % больше данных прошлого года.

Для более детального анализа ретроспективной динамики относительной горимости лесов по лесопожарным зонам использовались данные ИСДМ-Рослесхоз (<https://nffc.aviales.ru/>) (в части административно-территориального деления и лесопожарного зонирования), а также набор данных, получаемые на основе прибора MODIS (шестая коллекция — МС6), которые прошли объединение горячих точек в «пожары» с использованием алгоритмов разработанных в ИКИ РАН и методов коррекции площадей разработанных в ИКИ РАН. Для снижения влияния на результат случаев горения, не связанных с лесными пожарами, в расчете учитывались только пожары на землях лесного фонда и только те, у которых покрытая лесом площадь, пройденная огнём, превышала 25 га. Сравнительный ретроспективный анализ горимости в разрезе

лесопожарных зон приведён на рисунке 3.3.2.2. На нём хорошо видно, что как число пожаров, так и площади, пройденные огнём, в пожароопасном сезоне 2023 г. не являются «аномальными» и даже несколько ниже среднееголетних значений, которые наблюдались за анализируемый период (2012–2022). В частности, зоне контроля лесных пожаров сократилось на 25 %, в зоне лесоавиационных работ сократилось на 48 %, и только в зоне наземного обнаружения и тушения увеличилось на 15 % (что на общую статистику практически не влияет).

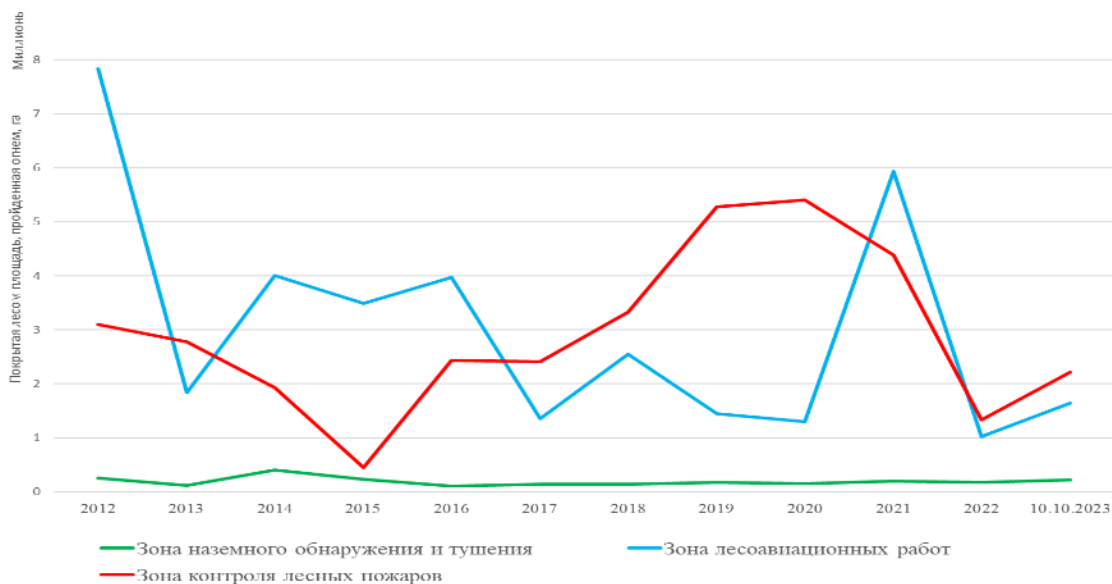


Рисунок 3.3.2.2 — Динамика покрытой лесом площади, пройденной огнём (в разрезе лесопожарных зон, для земель лесного фонда, пожары, с покрытой лесом площадью более 25 га)

На наш взгляд, наряду с общей характеристикой пожароопасного сезона (данные на всю страну) безусловно представляет интерес горимости отдельных регионов, а также объективное (сопоставимое) сравнение её для различных регионов, которые могут отличаться по лесорастительным условиям и в первую очередь по площадям покрытой лесом территорий регионов.

Такую оценку можно провести с использованием традиционной шкалы, основанной на отношении площади, пройденной огнём, к общей площади анализируемой территории (приведённой к 1000 га площади лесов). (Указания по проектированию противопожарных мероприятий в лесах СССР. Одобрены Госкомлесхозом СССР 29.01.1982.) Полученное, в соответствии с указанной методикой, среднее значение относительной горимости для всей территории страны составляет 3,5 га на тыс. га. Распределение горимости по регионам представлено на рисунке 3.3.2.3. Распределение по классам горимости представлено на рисунке 3.3.2.4а. Хорошо видно, что в соответствии данными, полученными по используемой методике в 2023 г. в России, наблюдаемая горимость оценивалась как «высокая» (доля площади территории с чрезвычайной горимостью составляет 41 % площади лесов). В тоже время как видно из данных о лесных площадях, пройденных огнём, которые приведены выше, 2023 г. в целом по стране нельзя признать годом с «чрезвычайной» горимостью. Это же подтверждает и анализ площадей пройденных огнём в большинстве регионов. Наблюдающееся противоречие полученной оценки горимости на основе традиционной и анализа многолетних наблюдений лесных площадей пройденных огнём, отчасти может быть связано с тем, что традиционная шкала формировалась по наземным данным, в которых в силу значительной субъективности схем их получения могут быть значимые неточности. Это в том числе, может приводить и к некорректности установки уровней горимости для отдельных территорий.

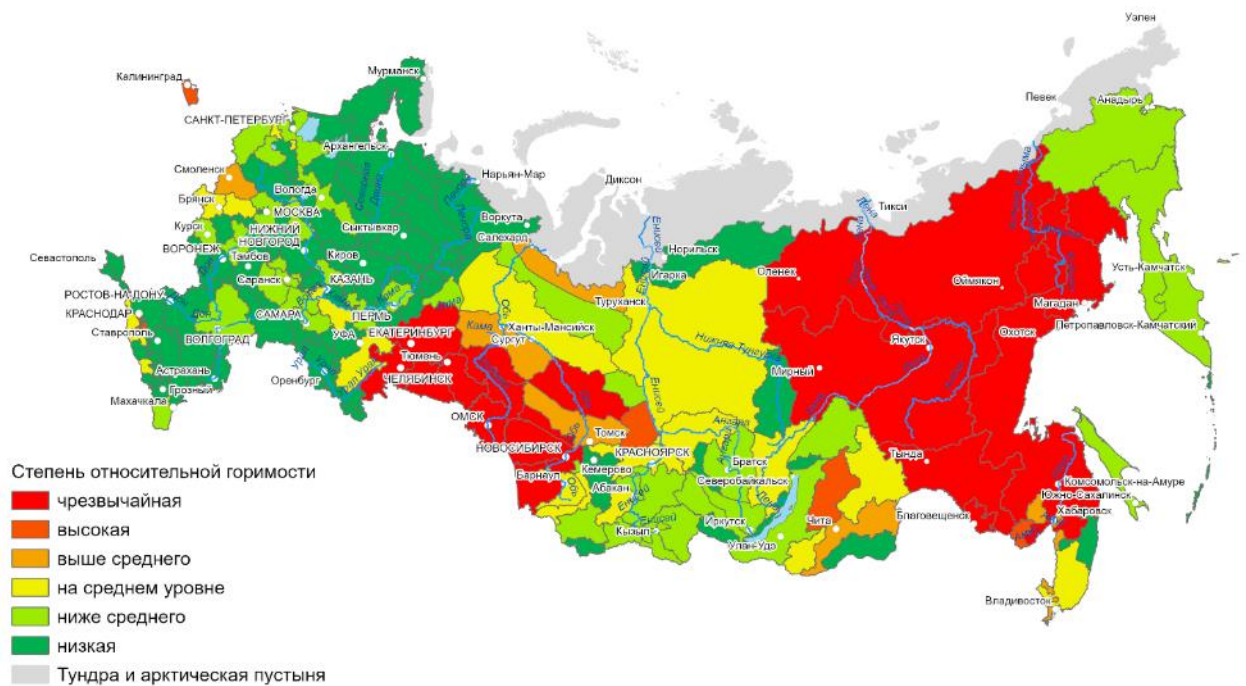


Рисунок 3.3.2.3 — Оценка степени относительной горимости лесов по традиционной шкале

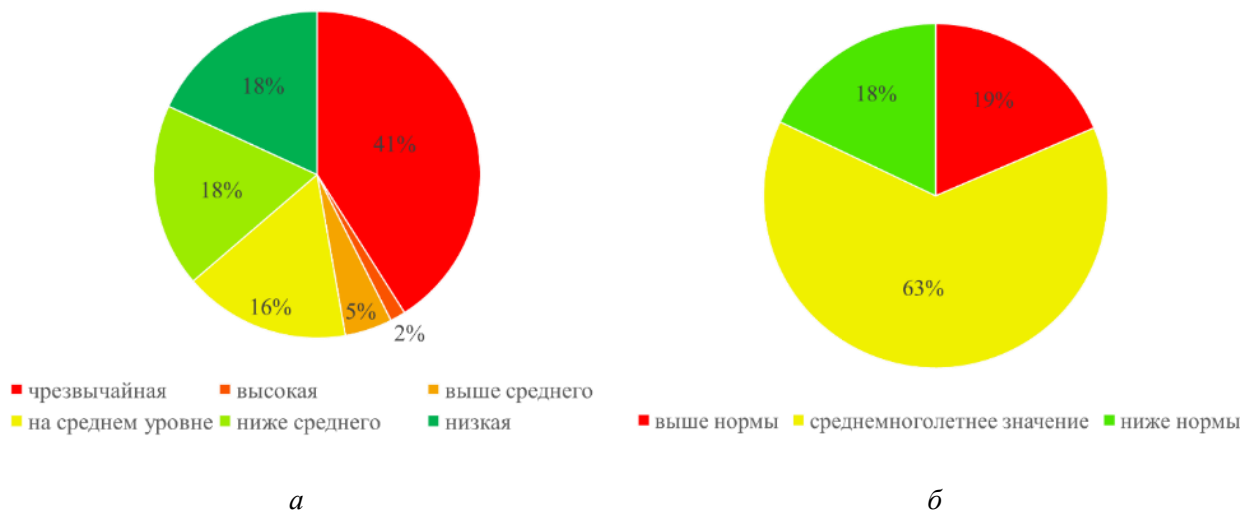


Рисунок 3.3.24.4 — Доля площади земель лесного фонда, с точки зрения уровня относительной горимости лесов (а) и сравнения со среднемультилетними значениями (б)

На наш взгляд, для более объективной оценки уровня горимости может быть использованы более объективные и однородные спутниковые данные. При этом получения пороговых значений горимости может производиться на основе статистических многолетних распределений горимости в отдельных регионах и оценки отклонения от среднемультилетних значений на величины, превышающие стандартного отклонения. Для более детальных оценок формы распределений могут быть проанализированы и более детально. Например, форма распределения значений площадей пожаров (включая относительную горимость) существенно ближе к логнормальной чем к нормальной. С этой точки зрения логичнее для оценки интервала, значения показателя в котором считать «на уровне среднемультилетних значений», необходимо рассчитывать по величине стандартного отклонения от математического ожидания не самих значений, а преобразованных (натуральным логарифмом) значений относительной горимости. Именно такие границы нами были установлены для отнесения горимости различных регионов в 2023 г. к группе «среднемультилетнее значение». Те территории, где



преобразованное значение было выше этой границы (больше математического ожидания плюс стандартное отклонение), отнесены к уровню "выше среднего". Соответственно, к группе «ниже нормы» отнесены территории, где преобразованное значение ниже указанной выше границы (меньше математического ожидания минус стандартное отклонение). Распределение горимости по регионам полученное в соответствии с данной шкалой представлено на рисунке 3.3.2.5. Распределение по классам горимости изображено на рисунке 3.3.2.4а. Хорошо видно, что в соответствии этими данными в России в целом наблюдалась наблюдаться в достаточно «не высокая» горимость (доля площади территории с чрезвычайной горимостью составляет 19 % площади лесов). Это в целом соответствует данным, полученным на основе анализа лесных площадей, пройденных огнём, которые приводились выше. Кроме того, на наш взгляд регионы в которых действительно наблюдалась высокая горимость, в частности вводились режимы чрезвычайной ЧС в соответствии с предложенной методикой выделены вполне корректно. К этим регионам относятся: Свердловская область (почти в 31 раз к среднемноголетнему и 44 раза к прошлому году; Магаданская область +506 % к среднемноголетнему и +302 % к прошлому году; Алтайский край — +315 и +191 % соответственно, Новосибирская область — +232 и +30 %; Хабаровский край — +144 и -20 %; Республика Башкортостан — +122 и +760 %; Томская область — +3,6 и +109 %; Тюменская область — +72 и +53 %.

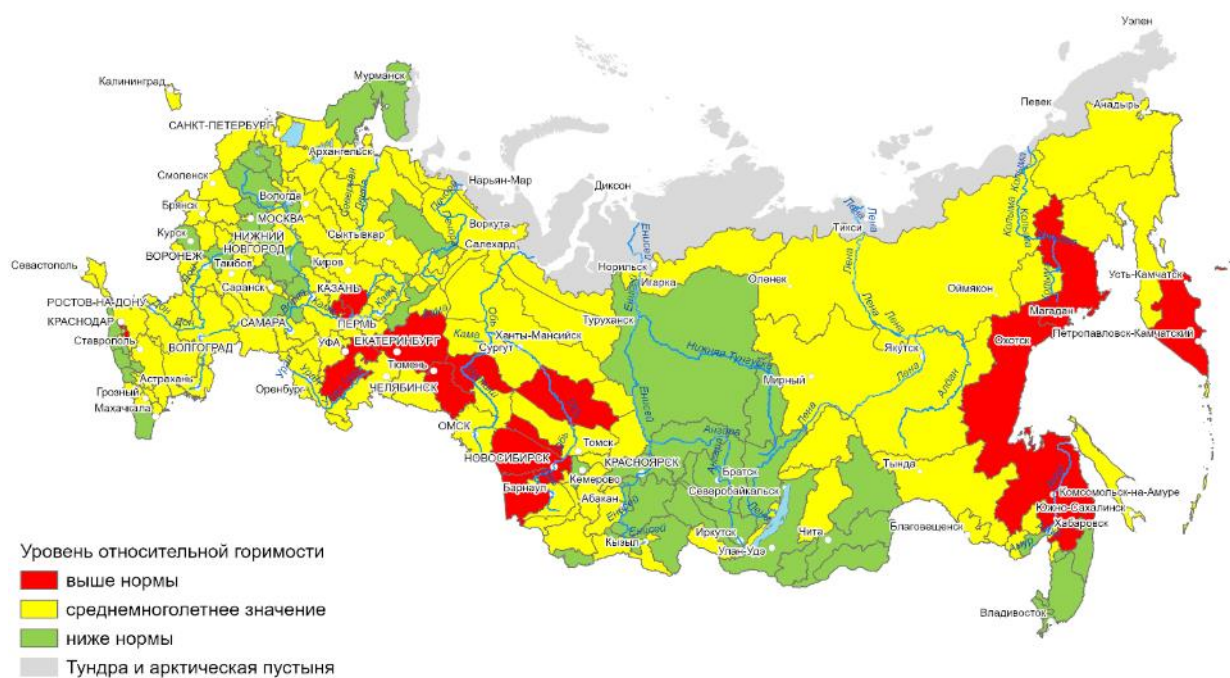


Рисунок 3.3.2.5 — Оценка степени относительной горимости лесов по адаптированной шкале

В заключение отметим, что представленный в работе анализ показал:

1. Пожароопасный сезон 2023 г. следует скорее отнести к сезонам средней или малой горимости.
2. Использование информации, полученной с учётом данных многолетних спутниковых наблюдений пожаров, видимо позволяет формировать достаточно объективные методы оценки горимости территорий.
3. Накопленные в настоящее время однородные спутниковые ряды наблюдений природных пожаров могут достаточно эффективно использоваться для объективной оценки горения различных регионов.
4. В перспективе видимо следует провести разработки, направленные на использование уже накопленной многолетнюю информацию дистанционного наблюдения лесных пожаров не только для оценки «интегральной» горимости

территорий, но и с оценками вклада в нее как объективных (например, погодных) факторов, так и работ по защите лесов от пожаров, в том числе работ по тушению пожаров.

Работа выполнена совместно с «Центром лесной пирологии» (Красноярский Филиал ВНИИЛМ).

### 3.3.3 Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения

Разработанный ранее в рамках темы «Мониторинг» метод оценки площадей погибших лесов на основе данных об интенсивности горения позволил получить информацию о гибели лесов от пожаров, которые происходили на северных территориях в XX в., на основе анализа однородных рядов наблюдения пожаров с использованием приборов MODIS установленных на спутниках Terra и Aqua. Полученные данные были использованы в анализе распределений пожаров и гибели лесов от них как по годам, так и по различным территориям (странам). Далее будут приведены данные для пожаров, которые развивались севернее 60° с.ш. (далее зона 60) и севернее полярного круга (66,562° с.ш.) (далее зона ПК).

В период с 2002 по 2021 г. в зоне 60 было зарегистрировано 70 659 пожаров<sup>1</sup>, а в зоне ПК — 5997 пожаров. При этом для зоны 60 в период с 2002 по 2011 г. было зарегистрировано 33 892 пожара и 36 767 пожаров — с 2012 по 2021 г. В зоне ПК с 2001 по 2011 г. было зарегистрировано 2395 пожаров, а с 2012 по 2021 г. — 3602 пожара. Распределение пожаров в этих зонах по годам и территориям (странам) приведено на рисунках 3.3.3.1 и 3.3.3.2.

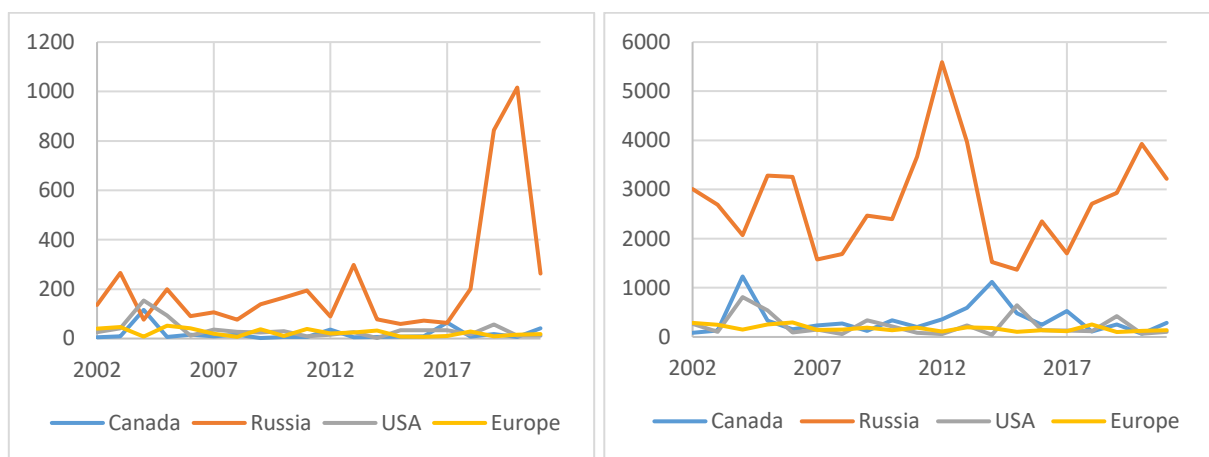


Рисунок 3.3.3.1 — Распределение пожаров, наблюдавшихся в период с 2002 по 2021 г.

В период с 2002 по 2021 г. в зоне 60 пожарами было пройдено 102 млн га лесной территории, а в зоне ПК — 8 млн га. При этом в зоне 60 погибло более 22 млн га лесов, а в зоне ПК — более 2 млн га лесов<sup>2</sup>. Распределение площадей гибели лесов от пожаров по годам и территориям (странам) приведено на рисунках 3.3.3.3 и 3.3.3.4.

<sup>1</sup> Здесь и далее под пожарами понимаются не отдельные ГТ, а группы ГТ объединённых по пространству и времени (ГТ, центры которых лежат на расстоянии меньше 0,5 км и время их регистрации отличается не более чем на 5 дней).

<sup>2</sup> Под погибшими лесами в данном случае понимаются леса с 5 средневзвешенной категории состояния — СКС (См. Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, 2007).

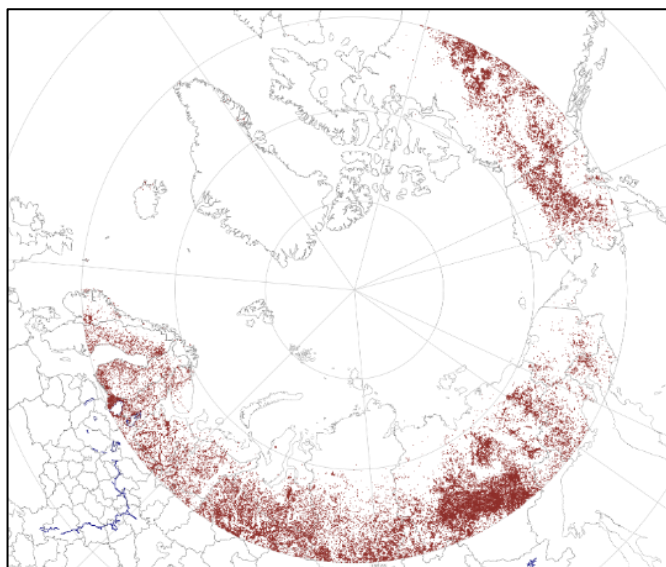


Рисунок 3.3.3.2 — Территории на которых возникали северные пожары в период с 2002 по 2021 г.

Следует отметить, что за периоды 2002–2011 и 2012–2021 гг. в зоне 60 погибло соответственно 7015 тыс. га лесов (1,2 % от всей лесной растительности в зоне; в среднем 19,6 % от площади, пройденной огнём) и 15 372 тыс. га лесов (2,6 и 23,3% соответственно), а в зоне ПК — 641 тыс. га лесов (2,8 и 23,7 % соответственно) и 1379 тыс. га лесов (1,9 и 26,5 % соответственно). Распределение гибели лесов по территориям (странам) и зонам приведено в таблице 3.3.3.1.

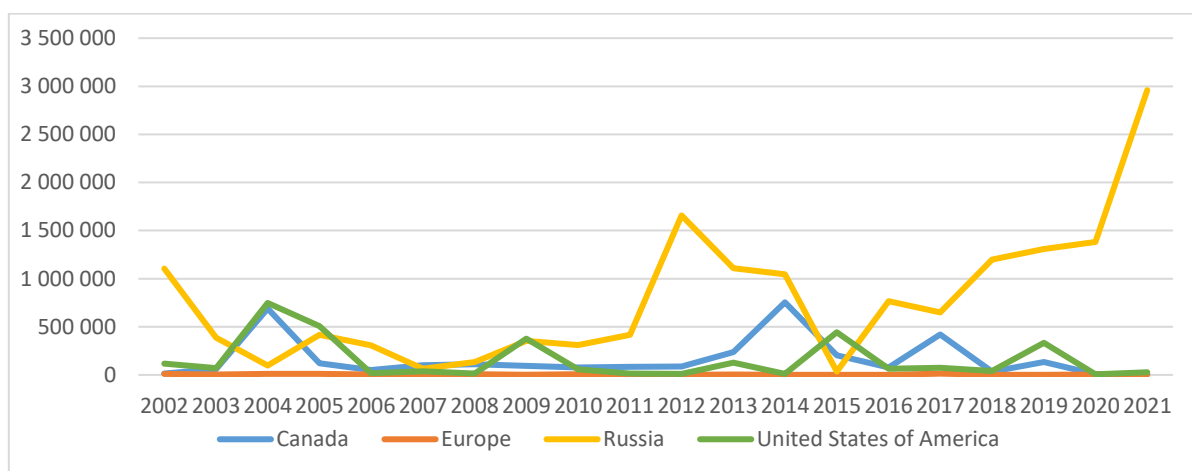
Таблица 3.3.3.1 — Средние значения в анализируемых зонах за периоды 2002–2011, 2012–2021 и 2002–2021 годы (площади погибшей лесной растительности (тыс. га)/доля (в %) площади погибших лесов от площади лесов страны в соответствующей зоне/доля (в %) площади погибших лесов от площадей лесов, пройденных огнём)

Зона, годы	Канада	Европа	Россия	США
Зона 60, 2002–2011	140/0,16/26,4	6/0,01/9,2	359/0,01/16,1	196/0,39/26
Зона 60, 2012–2021	196/0,22/24,5	4/0,01/8,8	1211/0,32/22,8	114/0,22/25,7
Зона 60, 2002–2021	168/0,19/25,2	5/0,01/9,0	785/0,2/20,8	155/0,31/25,9
Зона ПК, 2002–2011	12/0,12/26,4	2/0,02/13,4	12/0,03/14,9	38/0,56/29,9
Зона ПК, 2012–2021	14/0,13/28,5	1/0,01/12,1	101/0,24/25,8	22/0,3/31
Зона ПК, 2002–2021	13/0,13/27,5	2/0,01/12,9	56/0,13/24	30/0,43/30,3

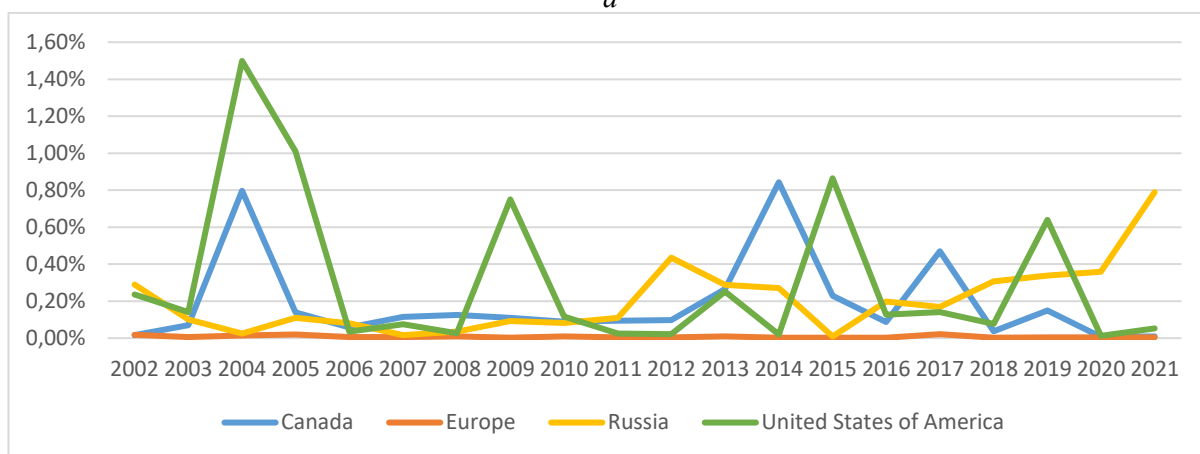
Полученные данные позволяют сделать следующие предварительные выводы.

- В последние десятилетия не наблюдается значимых изменений в числе пожаров в зоне 60. Тем не менее, нельзя не отметить, что в зоне ПК в 2019–2020 гг. произошёл резкий рост числа пожаров на территории России.
- Во второе десятилетие анализируемого периода на территории России наблюдается рост гибели лесов от пожаров в анализируемых зонах. Этот рост обусловлен аномальными пожарами 2020 и 2021 гг.
- В исследуемый период на территории США, Канады и Европы не наблюдается значимых трендов на изменение процента площади погибших от пожаров лесов от общей площади лесов в анализируемых странах. Такая же картина, как и в предыдущем пункте, наблюдается и для доли в процентах площади погибших от пожаров лесов от площадей, пройденных огнём.

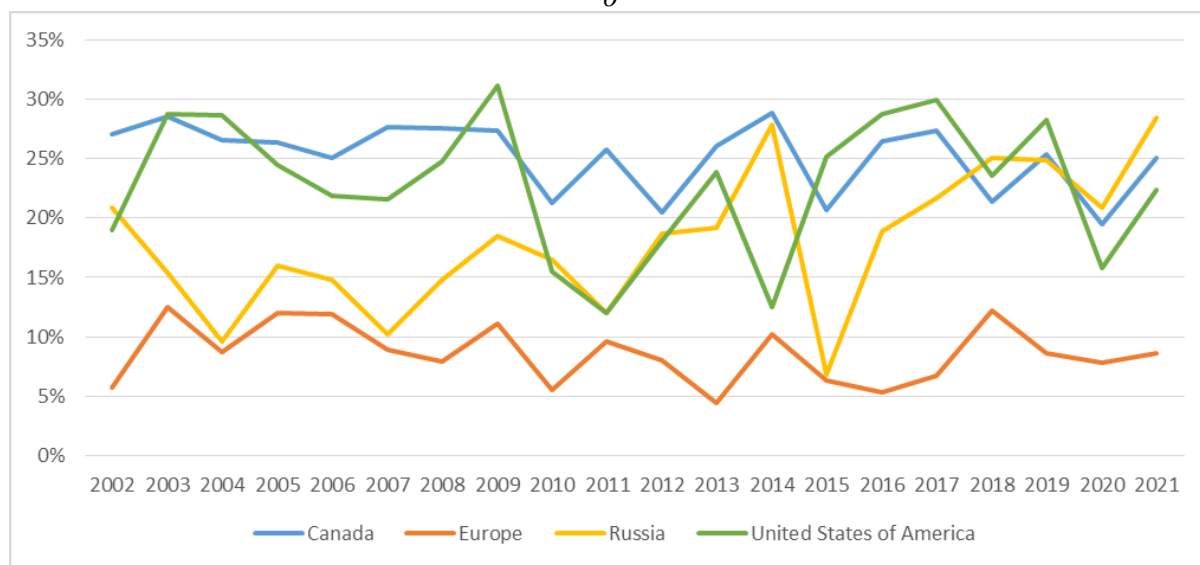
- Средние за весь анализируемый период доли площади погибших лесов по отношению к пройденной огнём площади леса в Канаде и США почти в 1,5 раза выше, чем в России, и почти в три раза выше чем в Европе. Это отчасти может быть связано с различным уровнем охраны лесов от пожаров в разных странах.



*а*

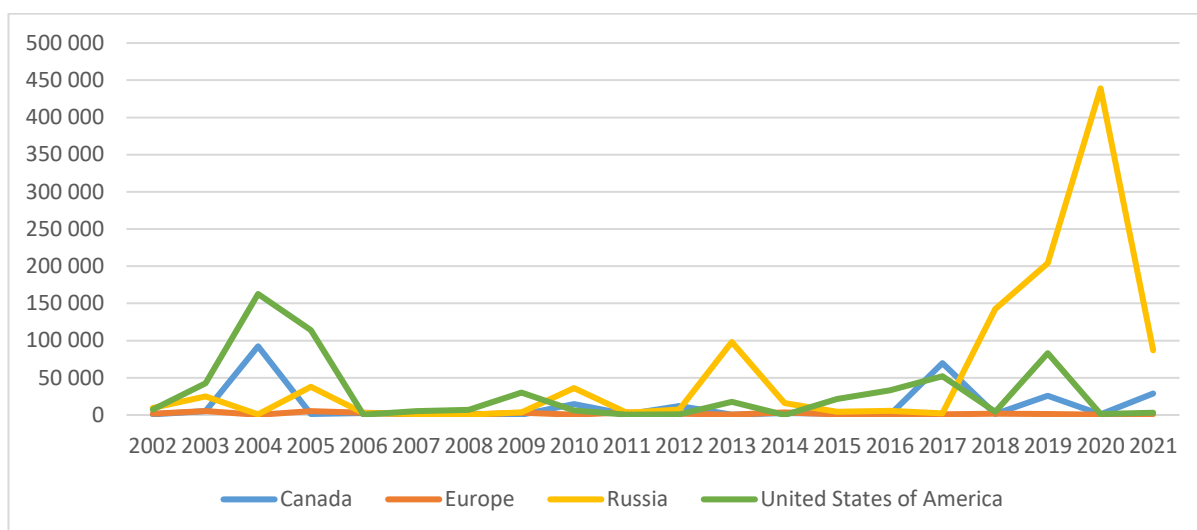


*б*

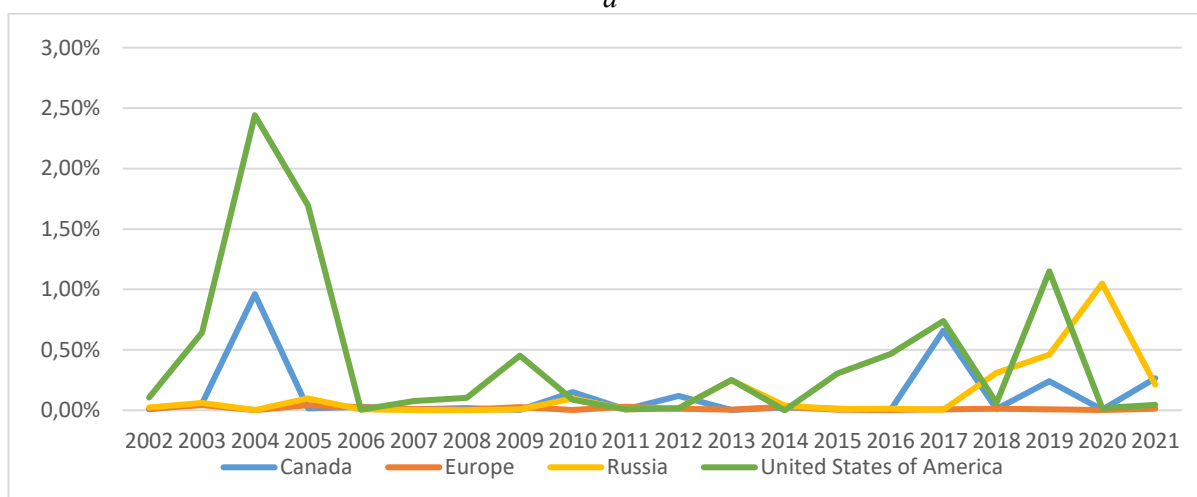


*в*

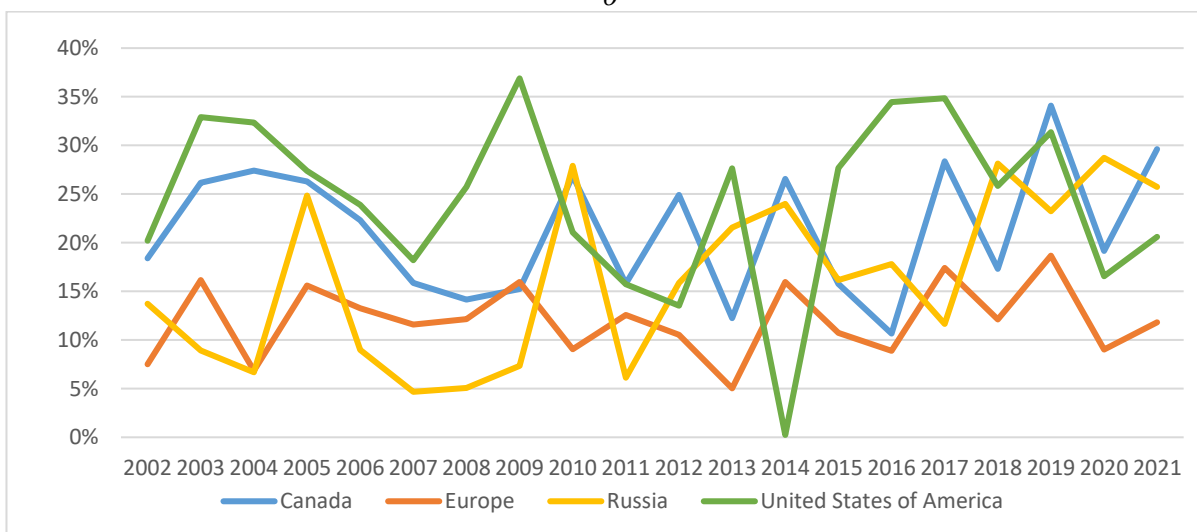
Рисунок 3.3.3.3 — Распределение гибели лесов от пожаров в зоне 60 в период с 2002 по 2021 г.: *а* — площадь в га; *б* — доля в % погибших лесов на территории различных стран (от площади лесной территории соответствующих стран); *в* — доля в % погибших лесов от площадей лесов, пройденных огнём, на территории различных стран



*a*



*b*



*v*

Рисунок 3.3.3.4 — Распределение гибели лесов от пожаров в зоне ПК в период с 2002 по 2021 г.:  
*a* — площади в га; *b* — доля в % погибших лесов на территории различных стран (от площади лесной территории соответствующих стран); *v* — процент погибших лесов от площадей лесов, пройденных огнём, на территории различных стран



### 3.3.4 Детектирование атмосферных рек по данным спутникового радиотепловидения

Формирование условий для развития крупномасштабных опасных метеорологических явлений часто связано с процессами быстрого перераспределения атмосферного водяного пара. В работах 2022 г. представлен алгоритм адаптируемого порогового значения интегрального влагосодержания, превышение которого является критерием детектирования атмосферных рек (АР). В 2023 г. исследования были направлены на проверку и доработку алгоритма по большому массиву данных.

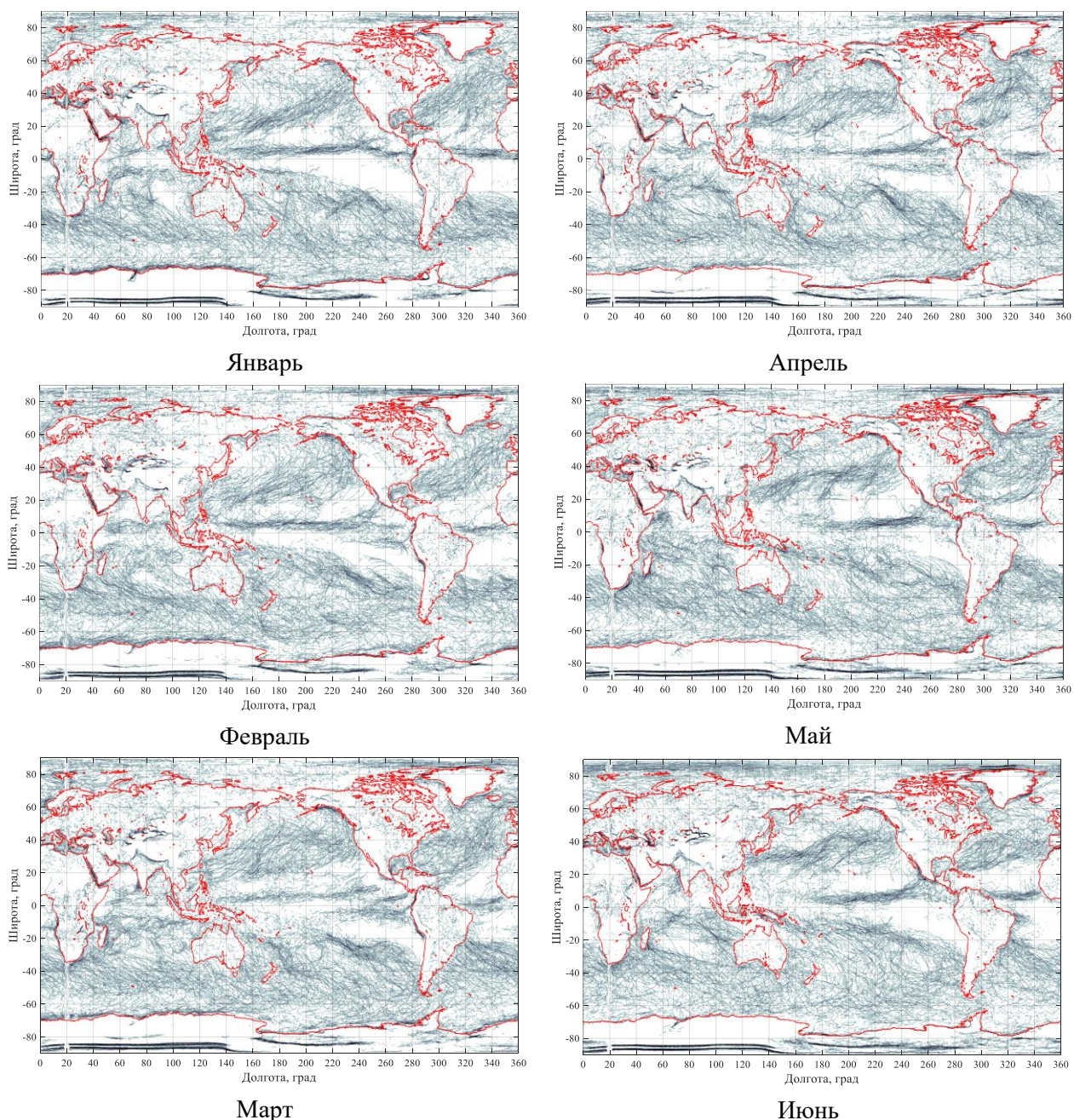


Рисунок 3.3.4.1 — Изображения скелетов АР, накопленные ежемесячно за первую половину 2012 г., показаны серыми линиями, красным цветом обозначены материки

При проверке алгоритма определения АР возникает закономерный вопрос: насколько устойчива АР, определённая по суточному изображению водяного пара, в пространстве. Наземные реки меняют свои русла, но это происходит довольно медленно, многие десятилетия. Атмосферные реки, в противоположность наземным, очень



изменчивы в силу того, что их положение определяется полем градиента атмосферного давления. Для проверки устойчивости положения АР на рисунке 3.3.4.1 собраны скелетированные изображения АР, накопленные ежемесячно за первую половину 2012 г. Такое представление АР позволяет выделить районы движения АР и проследить их месячные вариации. Изображения скелетов на рисунке 3.3.4.1 объединялись простым арифметическим сложением, что служило индикатором устойчивости данной АР.

На рисунке 3.3.4.2 представлены изображения скелетов АР за тот же период 2012 г., однако ежемесячное сложение проводилось с помощью «логической» операции таким образом, что показаны все скелеты, которые хоть раз появлялись в этом месяце. Такое представление АР показывает как их изменчивость, так и регион их формирования.

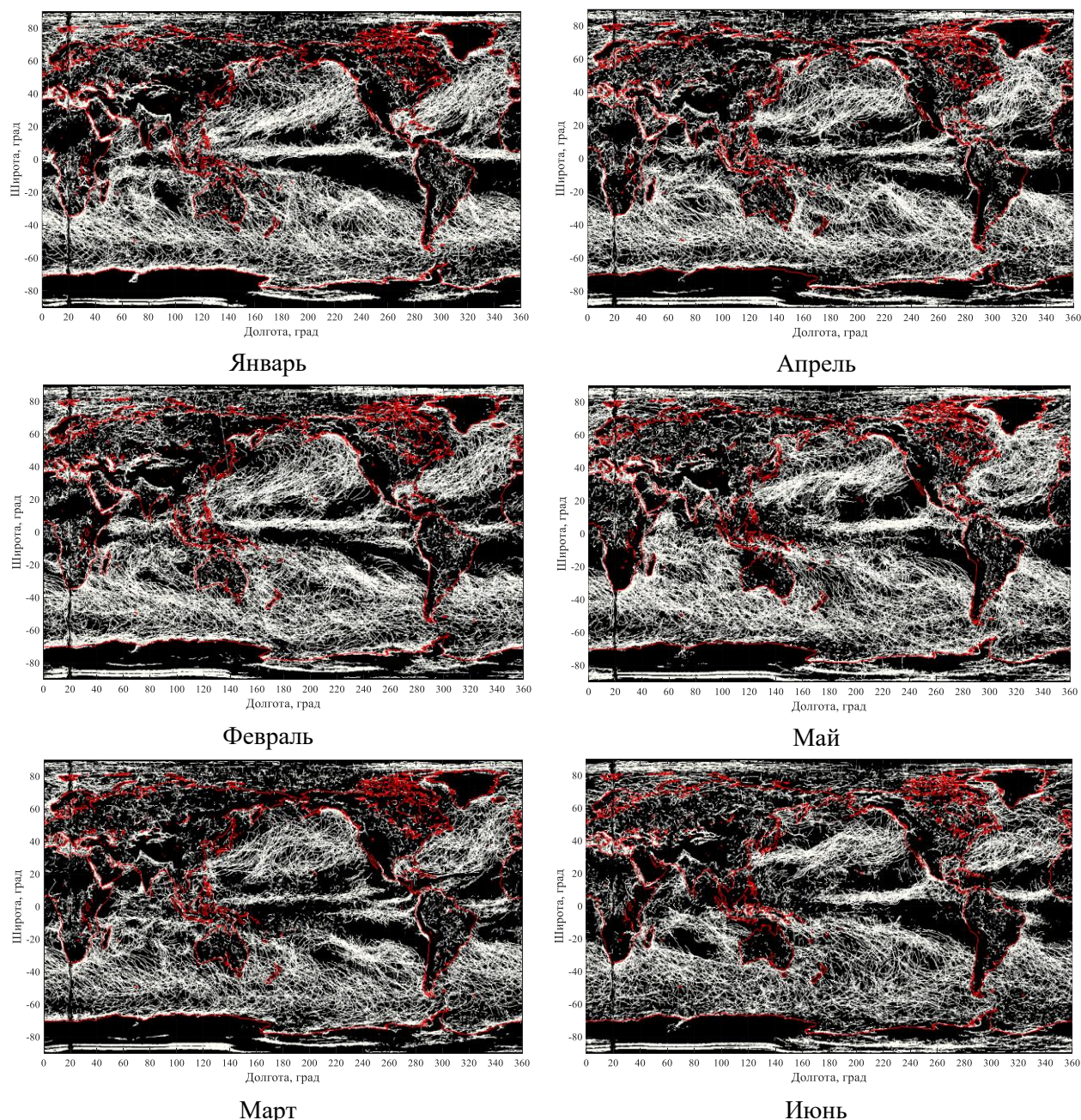


Рисунок 3.3.4.2 — Изображения скелетов АР накопленные ежемесячно за первую половину 2012 г. Скелеты АР показаны белыми линиями, красным цветом обозначены материки. Накопление проводилось по бинарным изображениям скелетов АР с помощью логической операции «или»

Метод спутникового радиотепловидения позволяет наряду с построением глобальных полей водяного пара оценить скорость его горизонтального переноса на



основе адаптированной методики анализа оптического потока, что даёт возможность измерить расход влаги через выбранное сечение АР. На рисунке 3.3.4.3 представлено суточное изображение интегрального влагосодержания, в котором оценён расход влаги через сечение, отмеченное чёрным прямоугольником. Расход влаги через этот рукав АР составил  $27,1 \cdot 10^6$  кг/с 2 июля 2019 г. в 06:00:00 местного времени. Сечение АР составила 12 градусов широты, что соответствует примерно 1300 км. Чёрными векторами показано направление горизонтального переноса, определённое методом спутникового радиотепловидения.

Дальнейшие планы исследований в данном направлении связаны, с одной стороны, с построением глобальной и региональной климатологии АР на основе автоматизации процесса детектирования АР; с другой стороны, с выявлением и количественным описанием параметров связи внутригодовых и межгодовых региональных особенностей формирования АР с развитием чрезвычайных ситуаций, экстремальных погодных явлений и стихийных бедствий и катастроф (наводнений, засух, усиления пожароопасности и др.).

По полученным длинным рядам глобальных полей водяного пара (2012–2022) и его адвекции на основе данных микроволновых спутниковых радиометров с использованием метода спутникового радиотепловидения предложена и программно промоделирована универсальная методика детектирования АР как над поверхностью Мирового океана, так и над сушей. Представленный алгоритм выделения АР построен на анализе изображений интегрального влагосодержания атмосферы PWV, полученных по данным микроволновых сканеров SSMIS. Использование метода спутникового радиотепловидения позволило получить полные суточные изображения PWV, убрав лакуны с пропусками данных. К такому изображению применялся адаптируемый порог значения интегрального влагосодержания, превышение которого является критерием детектирования АР. По заданному пороговому значению далее были построены бинарные маски областей высокого влагосодержания и проведена их скелетизация.

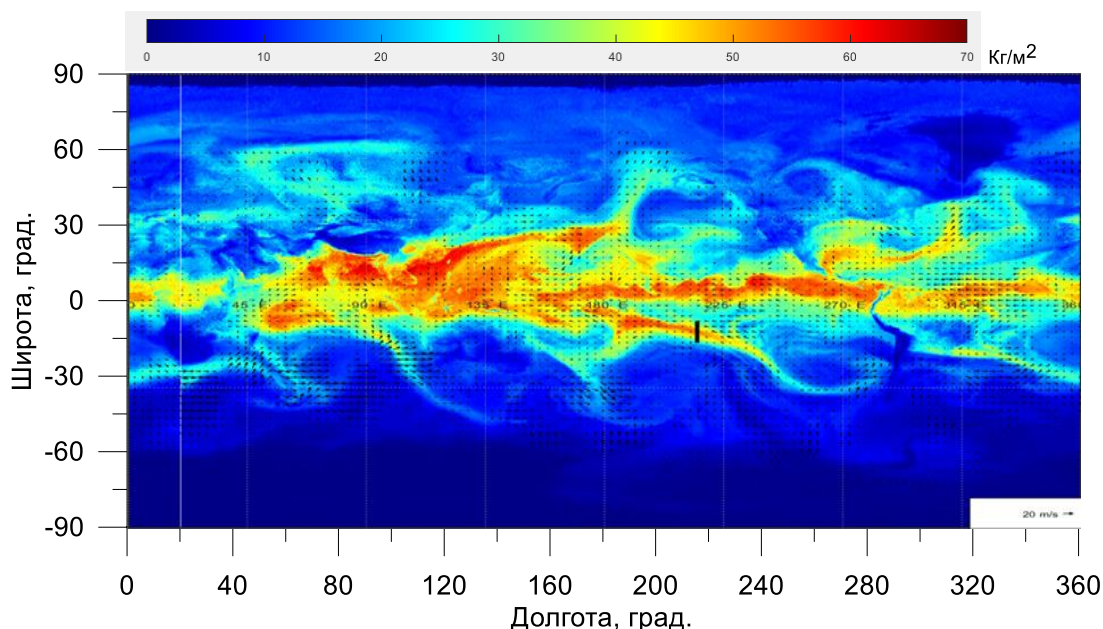


Рисунок 3.3.4.3 — Суточное изображение интегрального водяного пара на 2 июля 2019 г. 06:00:00 am. Черными векторами показаны направления горизонтальной адвекции, определённое методом спутникового радиотепловидения. Расход влаги через сечение, отмеченное чёрным прямоугольником, в АР равен  $27,1 \cdot 10^6$  кг/с

Проанализировано положение скелетов АР ежемесячно за первую половину 2012 г. Была продемонстрирована сильная изменчивость пространственного положения АР. Вместе с тем, положение и направление наиболее известных и стабильно формирующихся

АР чётко выделяется на изображениях. Метод спутникового радиотепловидения позволяет наряду с построением глобальных полей водяного пара оценить их горизонтальную адвекцию по специальной методике оценки оптического потока, что даёт возможность измерить расход влаги через выбранное сечение АР. В ближайшие планы авторов входит разработка и реализация автоматизированного алгоритма адаптируемого порога значений интегрального влагосодержания для разных сезонов, акваторий Мирового океана и суши, и оценки расхода влаги в АР. Этот шаг позволит перейти к построению региональной климатологии АР и выявлению вклада АР в формирование экстремальных погодных условий и стихийных бедствий.

### ***3.3.5 Мониторинг катастрофических гидрологических событий на основе разновременных данных дистанционного зондирования Земли***

Разрушение плотины Каховской ГЭС произошло в ночь с 5 на 6 июня 2023 г., что привело к резкому подъёму уровня воды в ее нижнем бьефе и падению уровня в Каховском водохранилище выше плотины, что ставит под угрозу не только соответствие водоема проектным характеристикам, но и его дальнейшее существование. Каховское водохранилище — самое нижнее по течению из всего каскада днепровских водохранилищ, введено в эксплуатацию в 1956 г. Расположено в Запорожской и Херсонской областях. При нормальном подпорном уровне (НПУ) 16 м площадь водоема составляет около 215 тыс. га (протяженность 230 км, ширина до 25-30 км), а объем превышает 18 км<sup>3</sup>. Горизонт мертвого объема (УМО, полной сработки водохранилища) имеет отметку 12,7 м. Из Каховского водохранилища осуществлялась подача воды в ряд каналов: Северо-Крымский, Каховский и Днепр – Кривой Рог. Водоем имеет высокую водохозяйственную и гидроэнергетическую ценность, а также играет большую роль в воспроизводстве рыбных ресурсов. Донные отложения водохранилища содержат высокие концентрации различных загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов и радиоактивных элементов, поэтому обнажение дна водоема и его высыхание могут привести к их переносу. Одной из экологических проблем Каховского водохранилища также является высокая степень эвтрофикации, которая приводит к бурному размножению сине-зеленых водорослей в условиях летнего нагрева практически стоячей воды. Таким образом, разрушение плотины Каховской ГЭС привело к деградации важнейшего водоема с точки зрения экономики, экологической безопасности и устойчивого развития нескольких регионов.

Данные дистанционного зондирования Земли из космоса достаточно широко применяются для оценки последствий различных чрезвычайных ситуаций, связанных с повреждениями гидротехнических сооружений, засухами, которые приводят к падению уровней воды в водохранилищах или наводнениями. Уровень Каховского водохранилища по данным сервиса Theia упал с 17,2 м на 04.06.2023 г. до 11,9 м на 09.06.2023 г., что значительно ниже УМО, в результате чего обнажилось дно водоема (рисунок 3.3.5.1). Площадь водоема от г. Запорожье до плотины Каховской ГЭС на 02.06.2023 г. по данным Landsat составила 209,1 тыс. га, на 18.06.2023 г. водоем уменьшился практически вдвое до 109,9 тыс. га. Осушение дна водохранилища на такой значительной площади — исключительная ситуация, последствия которой еще предстоит оценить.

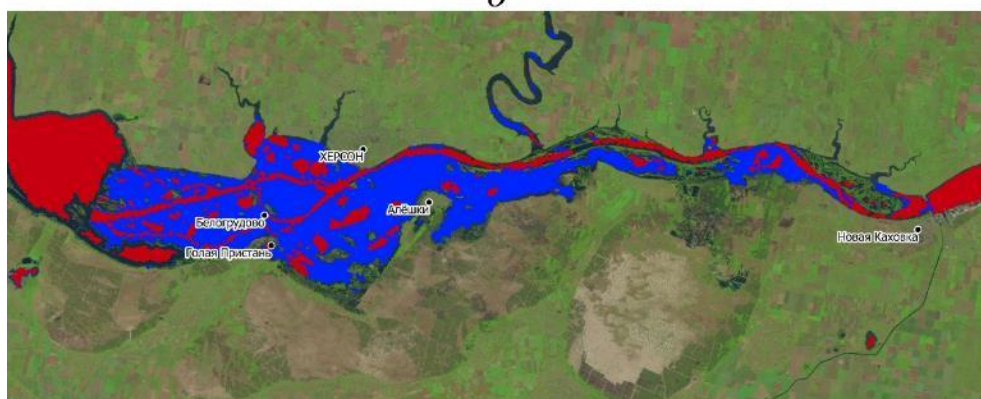
Подобные относительные уменьшения площади водного зеркала водохранилищ отмечались только в 2018-2020 г., когда в Крыму из-за засухи и прекращения поступления днепровской воды через Северо-Крымский канал площадь отдельных водоемов уменьшилась в десять и более раз. Самое крупное водохранилище Крыма — Фронтное имеет проектную площадь всего 645 га, поэтому масштабы осушений дна несопоставимы с Каховским водохранилищем. В 2020 г. площадь Цимлянского водохранилища на р. Дон сократилась почти на 70 тыс. га или четверть от проектной, но отметки УМО все же не были достигнуты.



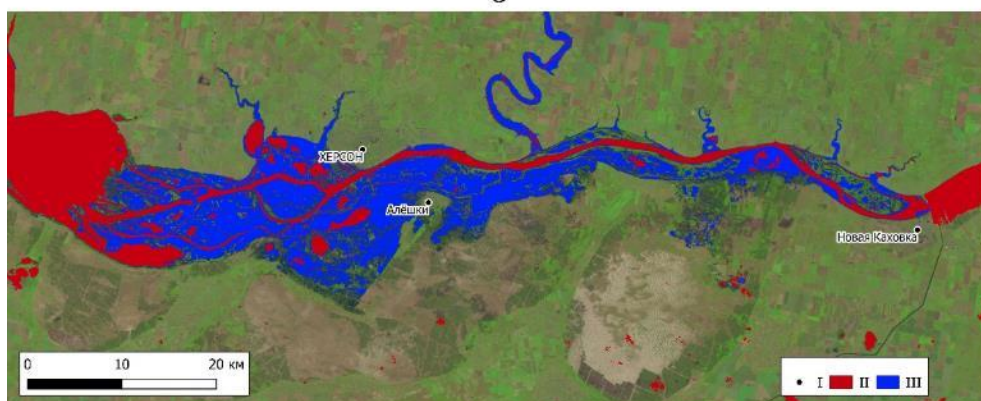
а



б



в



г

Рисунок 3.3.5.1 — Спутниковые изображения Landsat Каховского водохранилища до (а, 02.06.2023 г.) и после разрушения плотины Каховской ГЭС (б, 18.06.2023 г.), схема изменения водного зеркала по данным MODIS (в) и Landsat (г, I — населенные пункты, II — 18.06.2023 г., III — 02.06.2023 г.)



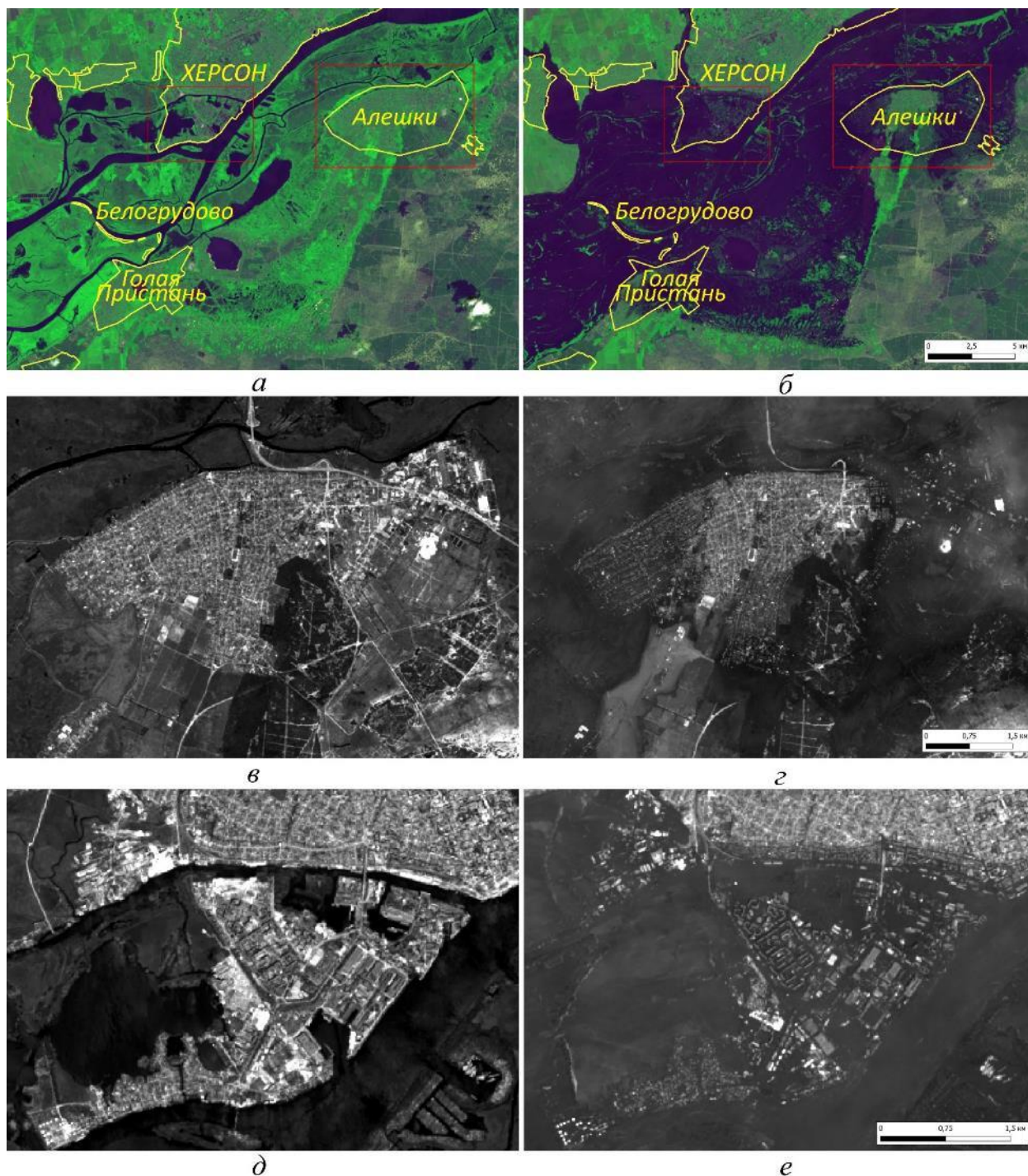


Рисунок 3.3.5.2 — Спутниковые изображения Landsat в районе Херсона (а — 01.06.2023 г., б — 09.06.2023 г., увеличенные фрагменты панхроматического изображения на эти же даты: в, г — г. Алёшки, д, е — южная часть Херсона; красный контур — положение фрагментов в-е, жёлтый контур — границы населенных пунктов)

Согласно карте типов земного покрова ESA WorldCover затопленными и подтопленными на 09.06.2023 г. оказалось примерно 670 га искусственных поверхностей, к которым могут быть отнесены здания, дороги, теплицы и другие объекты застройки. Почти 350 га из них расположены в городах Херсон и Алёшки. Также затоплены оказались около 390 га пахотных земель, 800 га лесов, 4,5 тыс. га лугов и 26 тыс. га водно-болотных угодий. Сопоставление границ населенных пунктов по данным Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org/>) с маской водного зеркала на 09.06.2023 г. позволило выделить 24 затронутых наводнением населенных пункта, около 11% площади которых

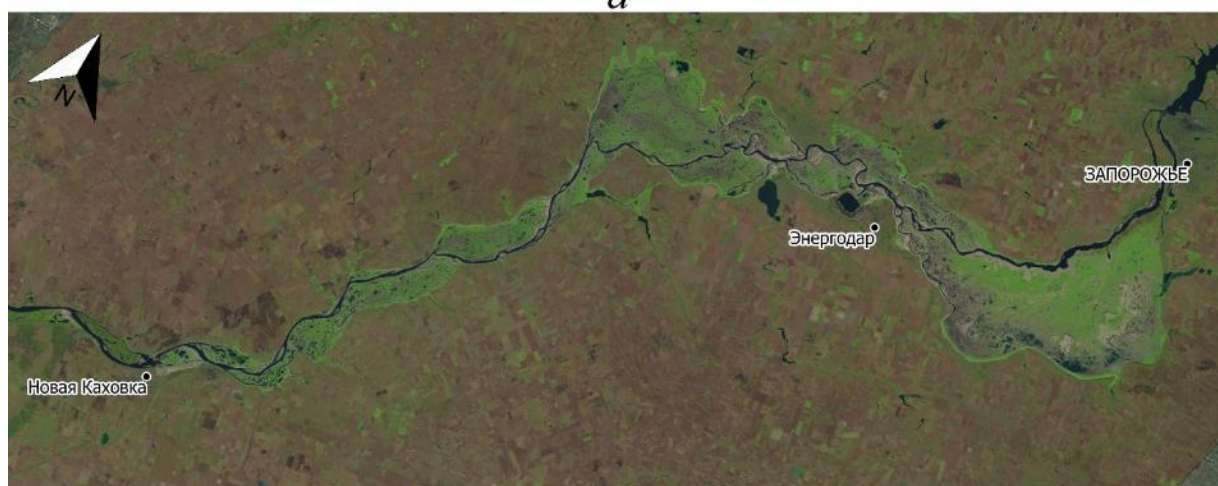


оказались затопленными (примерно 2 тыс. га). Наиболее пострадали населенные пункты Голая Пристань, Алёшки и Белогородово, площадь затопления в которых составила от 25 до 61%. Также было затоплено около 9% площади г. Херсон. Лес, здания и высокостебельная растительность водно-болотных угодий зачастую не полностью покрываются водой, из-за чего маскируют водное зеркало. По этой причине площадь затопленных и подтопленных зданий и лесов может быть значительно больше, что подтверждается рисунком 3.3.5.2.

Данные дистанционного зондирования Земли могут применяться не только для оценки изменений площади водоемов, но и для мониторинга состояния осушек и переходных экосистем «вода-суша», а также сукцессионных изменений на высохшем дне (рисунок 3.3.5.3). Это открывает уникальные возможности дальнейшей оценки последствий падения уровня воды и высыхания дна Каховского водохранилища, что является очень важной задачей, поскольку в нашей стране подобные равнинные водохранилища занимают значительные площади. В рамках данного исследования формируется набор спутниковых данных для последующего долговременного мониторинга состояния осушенной чаши Каховского водохранилища.



*а*



*б*

Рисунок 3.3.5.3 — Спутниковые изображения Landsat Каховского водохранилища 5 августа (а) и 30 сентября 2023 г. (б)

К концу сентября 2023 г. площадь водной поверхности в границах Каховского водохранилища составила всего 20,8 тыс. га, что в десять раз меньше величины на начало июня. Интерес представляют сукцессионные процессы на осушенном дне водоема, поскольку считается, что осушение равнинных водохранилищ неизбежно приведет к

возникновению пыльных бурь и выносу донных отложений. После 5 августа отмечается процесс зарастания бывшего дна водохранилища (рисунок 3.3.5.4). При этом площадь участков с  $NDVI < 0,2$  (открытая почва и очень редкая растительность) снизилась с 57,2% на начало августа до 21% на конец сентября. Кроме этого, отмечается рост площадей, занятых высокопродуктивной растительностью. На 30 сентября 24,1% площади занят участками с  $NDVI > 0,6$ . Таким образом, есть предпосылки для зарастания осушенного дна Каховского водохранилища, что позволит избежать ветровой эрозии. В дальнейшем кроме процессов зарастания интерес будут представлять гидрологические изменения, русловые деформации и различные геоморфологические процессы. Дно Каховского водохранилища обнажилось впервые после постройки Каховской ГЭС, теперь здесь возможен пойменный режим с периодическими заливаниями при половодьях, претерпевают изменения гидравлические связи поверхностных вод Днепра и грунтовых вод окружающих ландшафтов.

В результате разрушения плотины Каховской ГЭС площадь затопления и подтопления в нижнем бьефе составила не менее 36 тыс. га, в том числе около 2 тыс. га земель населенных пунктов и 670 га застройки и хозяйственных объектов. Наиболее сильно затронуты населенные пункты Белогрудово, Алёшкино, Голая Пристань и город Херсон. На спутниковых изображениях Днепра по данным Landsat ниже плотины Каховской ГЭС 17-18 июня 2023 г. площадь затопления снизилась вследствие падения уровня воды, более точная оценка затруднена из-за облачности. Площадь Каховского водохранилища на 20.06.2023 г. уменьшилась почти в два раза — с 209,1 тыс. га до 109,9 тыс. га. На 30 сентября площадь водной поверхности в границах водохранилища сократилась до 20,8 тыс. га, река Днепр фактически вернулась в естественное русло.

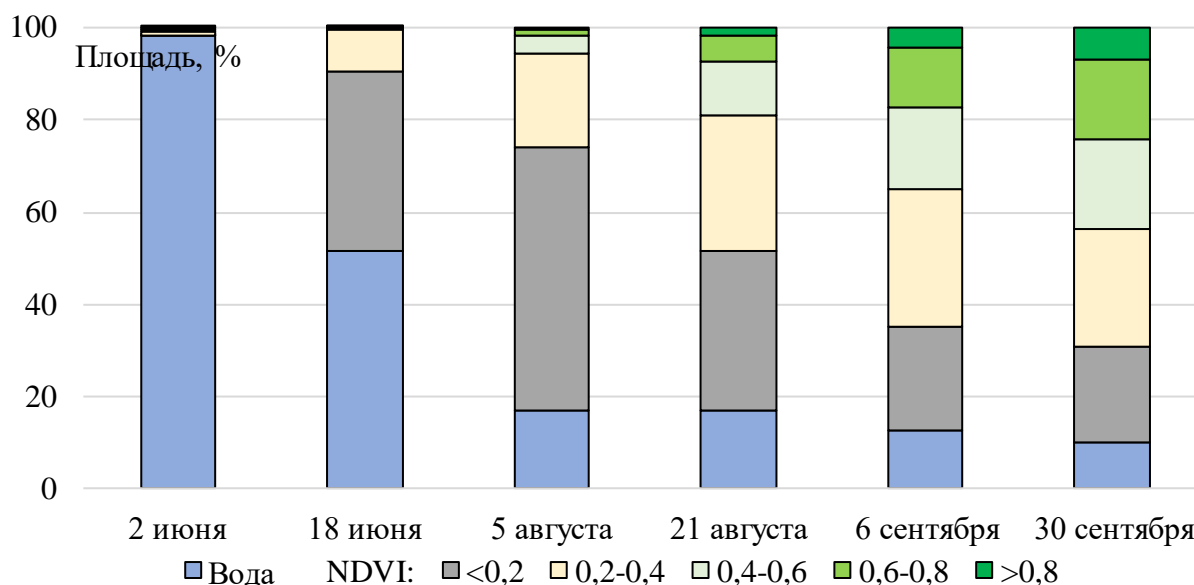


Рисунок 3.3.5.4 — Распределение площади чаши Каховского водохранилища после разрушения плотины ГЭС по значениям NDVI

## 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, для изучения климатических изменений арктической и антарктической зонах атмосферы Земли, а также крупномасштабных погодно-климатических колебаний типа муссонов, явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

- развитие методов дистанционной диагностики процессов, протекающих в криосфере Земли, в том числе исследование сезонной и многолетней динамики северной полярной шапки, анализ состояния пресноводных акваторий в период ледостава, определение характеристик замерзающих водно-болотных угодий для изучения климатических и экологических изменений арктических и субарктических территорий;
- Развитие методов и подходов мониторинга и прогноза крупномасштабных опасных природных и антропогенных явлений.

Таким образом материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Климат» в 2023 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 2023–2025 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 радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий. 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 2023 г. результаты также изложены в основных публикациях [39, 40, 43–46, 78, 98, 99, 101–103, 105, 108, 138].

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

#### *4.1.1 Экспериментальные исследования статистических связей приводного ветра с оптическими и микроволновыми характеристиками морской поверхности на Черноморском гидрофизическом полигоне*

В сентябре – октябре 2023 г. в рамках подспутниковых измерений по теме «Мониторинг-Океан» был проведён комплексный эксперимент по исследованию связи приводного ветра с динамикой развития ветровых волн на морской поверхности, процессов взаимодействия микроволнового собственного излучения на границе морской поверхности и атмосферы с учётом взаимосвязи с ветром в приводном слое атмосферы и структурой морского волнения. Эксперимент проводился на Черноморском гидрофизическом полигоне Морского гидрофизического института РАН (МГИ РАН). Эти исследования носят фундаментальный характер, поскольку необходимы для решения сложных многопараметрических задач оптического и микроволнового зондирования Земли из космоса или с борта летательных аппаратов.

Гидрофизическая платформа, на которой проводился эксперимент, расположена в 600 м от берега в Голубой бухте близ посёлка Кацивели Республики Крым. Для микроволновых измерений использовалась поворотная сканирующая система «Траверс-2», на которой был установлен комплекс из двух радиометров 8-мм диапазона (центральная частота 36 ГГц, приёмная полоса 2 ГГц), измеряющих три параметра Стокса микроволнового излучения, и веб-камера (рисунок 4.1.1.1). Поворотная платформа «Траверс-2» управлялась программно через компьютер, и радиометры могли поворачиваться в азимутальной и угломестной плоскостях, кроме того, радиометры поворачивались к калибровочным нагрузкам, которые были установлены на платформе. Температура «чёрных тел» калибровочных нагрузок составляла 14,1 и 49,9 °С и поддерживалась автоматически с помощью системы термостабилизации.



Персональный компьютер, на который записывались данные радиометрических приёмников и их положение в пространстве, был подключён к сети интернет, что позволяло дистанционно управлять экспериментом. На компьютере регистрировались данные термодатчиков, измеряющих температуру воздуха и воды на глубине 1,5 м, а также термодатчиков, расположенных в нагрузках «горячего» и «холодного» чёрного тела, использующихся для калибровки радиометров. Были установлены две веб-камеры, изображения с которых записывались на компьютер каждые 2 с. Одна из камер была размещена соосно с радиометрами и регистрировала поле зрения радиометров. Другая камера была закреплена таким образом, что записывала изображения воды и атмосферы в районе эксперимента.



Рисунок 4.1.1.1 — Поворотная платформа «Траверс-2» с комплексом из двух радиометров 8-мм диапазона и веб-камера. Внизу видны калибровочные нагрузки

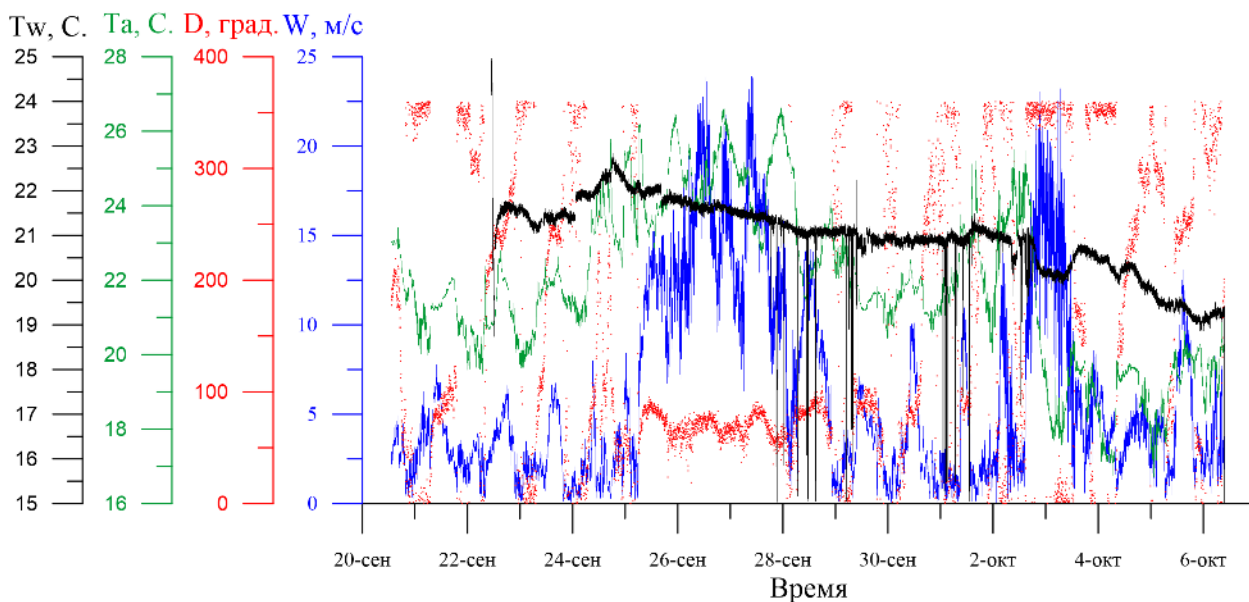


Рисунок 4.1.1.2 — Данные температуры воды  $T_w$  и воздуха  $T_a$ , направления  $D$  и скорости приповерхностного ветра  $W$  за все время эксперимента с 20 сентября по 6 октября 2023 г.

Для регистрации метеорологической обстановки использовались два метеорологических комплекса МК-15, расположенных на разных горизонтах: 5 и 25 м от уровня моря, в составе двух ультразвуковых трёхкоординатных анемометров, датчиков температуры, влажности воздуха и атмосферного давления. Данные комплексов МК-15

записывались на отдельный персональный компьютер. На рисунке 4.1.1.2 представлены метеорологические данные за все время эксперимента.

Для оптических измерений использовались две видеокамеры Nikon D7000, три лазера с длиной волны 450 нм, мощностью 3 Вт и один лазер 520 нм, 1,5 Вт, два сканатора, обеспечивающих развёртку лазерного излучения, и регистрирующий компьютер для управления сканаторами и лазерами. С помощью этой аппаратуры были разработаны методы высокоточных измерений профиля волнения, которые основаны на синхронизации начала сканирования лазерного луча по морской поверхности и начала записи рассеянного на поверхности излучения на матрицу видеокамеры. Проводилось приведение высот всех точек профиля к единому моменту времени за счёт учёта скорости вертикального движения волновой поверхности между видеокадрами и учёта времени задержки лазерного луча по отношению к началу развёртки. Это позволило получать «мгновенные» профили морской поверхности с частотой съёмки видеокамеры 30–60 Гц. При этом точность регистрации высоты в каждой точке траектории составляет 0,5 мм, а точность синхронизации по времени — 0,1 мс. Методика сканирования повышает отношение сигнал/шум на границе раздела, что позволяет проводить измерения в любое время суток.

В настоящее время проводится обработка комплексных натурных измерений приводного ветрового поля с помощью акустических анемометров, параметров морской поверхности с использованием экспедиционной версии оптического волнографа с добавлением радиометрических поляризационных измерений «портрета» взволнованной морской поверхности в микроволновом диапазоне длин волн. Накопление длительных рядов видеоизображений гравитационных, гравитационно-капиллярных и капиллярных волн в течение продолжительных интервалов измерений позволит получить статистические связи между динамикой ветрового поля у поверхности и измеренными параметрами волнения. Статистическая обработка и систематизация данных с целью формирования корреляционных связей радиометрического портрета морской поверхности с ветровым режимом и структурой морской поверхности даст возможность получить новые знания о сложных и неоднозначных связях между этими величинами.

## **4.2 Разработка научных основ совместного использования новейших радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий.**

### ***4.2.1 Горизонтальная тонкая структура течения речных вод в дельте Волги по спутниковым данным высокого пространственного разрешения***

*Работа выполнялась совместно с коллегами из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), Москва и Морского гидрофизического института РАН (МГИ РАН), Севастополь*

С 1995 г. по настоящее время уровень Каспийского моря снизился почти на 3 м, что существенным образом сказывается на морфометрии и экологическом состоянии мелководных районов. В первую очередь это касается мелководного Северного Каспия и, особенно, дельты Волги, которая за эти годы выдвинулась на 10–20 км вперёд и приросла примерно на 3 тыс. км<sup>2</sup> по площади. Изменения морфометрических характеристик дельты Волги неизбежно сказываются на гидродинамических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристиках речных вод в авандельте. Исследования процессов в дельте Волги проводились в 2023 г. на основе комплексного анализа данных натурных измерений, выполненных учёными из ИО РАН им. П.П. Ширшова в мае 2021 г., и синхронных с полевыми измерениями данных спутниковых наблюдений.

В качестве спутниковой информации использовались данные спутника Landsat-8 сенсоров OLI (*англ.* Operational Land Imager) и TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor) и данные радиолокатора с синтезированной апертурой C-SAR спутника Sentinel-1; пространственное разрешение спутниковых данных составляло 30, 100 и 10 м соответственно.

В результате анализа спутниковых изображений дельты Волги в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра впервые удалось выявить тонкую горизонтальную структуру водотоков, представляющую собой чередование чётких несмешивающихся узких струй с существенно различающимися характеристиками по температуре, взвешенному веществу и хлорофиллу *a*. Эти струи присутствуют во всех относительно крупных рукавах и водотоках севернее 45°20' с.ш., их количество может достигать десятка на 5 км ширины канала и они не меандрируют и не смешиваются на протяжении десятков километров вниз по течению. Для детального исследования этого явления на основе спутниковых данных был построен разрез в поле температуры воды, концентрации взвешенного вещества, мутности и хлорофилла *a* по широте 45°36' с.ш. (рисунок 4.2.1.2), проходящий примерно через середину «Каменской бороздины», широкой водной протоки, показанной на рисунке 4.2.1.1. Этот разрез почти перпендикулярно пересекает обнаруженные струйные течения, что позволило установить количество и ширину струй, а также величину аномалий указанных параметров, связанных со струями. Ширина таких струй варьирует от 200 м до 2 км, а аномалии температуры — от 0,1 до 10 °С, мутности вод — 100–150 FNU (единицы мутности по формазину, *англ.* Formazin Nephelometric Units), концентрации взвешенного вещества — 10–25 г/м<sup>3</sup>, хлорофилла *a* — 0,5–2 мг/м<sup>3</sup>.

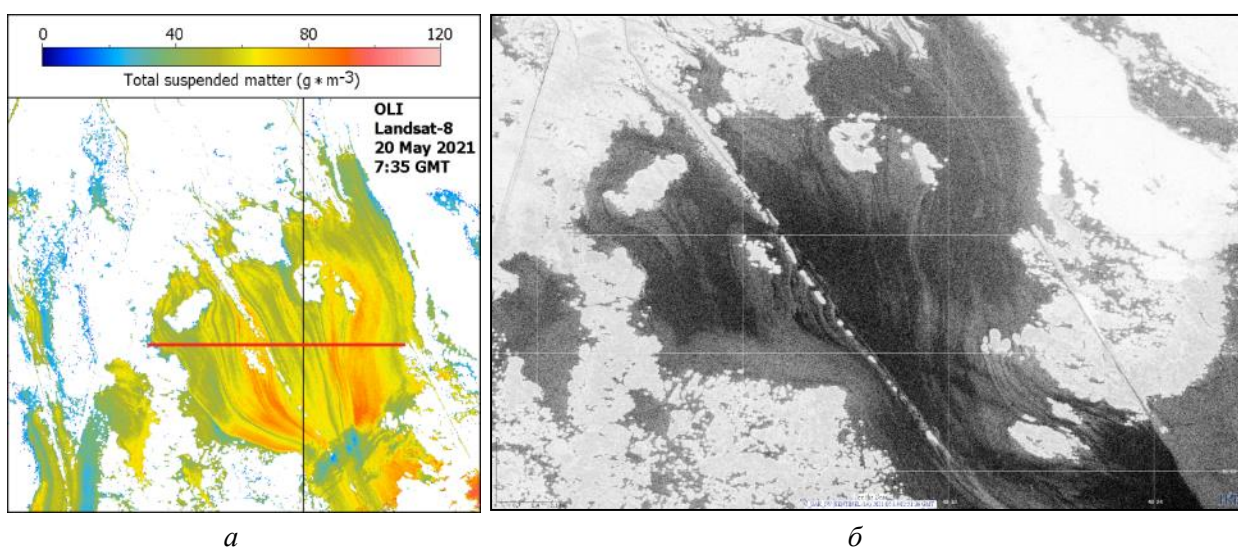


Рисунок 4.2.1.1 — Фрагменты спутниковых изображений акватории «Каменской бороздины»: *a* — карта общего содержания взвешенного вещества (г/м<sup>3</sup>), полученная на основе данных OLI Landsat-8 от 20 мая 2021 г. в момент проведения *in situ* измерений. Красная линия отмечает положение разреза; *б* — радиолокационное изображение C-SAR Sentinel-1A от 14 мая 2021 г.

Как показывает совместный анализ оптических и радиолокационных данных, во многих случаях видно, что относительно тёплые и менее мутные воды вытекают из некоторых «островов», причём на радиолокационном изображении, имеющем пространственное разрешение 10 м, это видно более отчётливо (см. рисунок 4.2.1.1б). Скорее всего, это не острова, а проточные заросли тростника и высшей водной растительности, в которых мутные речные воды фильтруются и несколько нагреваются (особенно в солнечную погоду) за счёт уменьшения скорости течения и контакта с густыми зарослями прибрежно-водных растений. Очевидно, что проточный барьер из тростника, камыша и различных видов высшей водной растительности представляет

собой эффективный механизм не только гидродинамической, но и гидрохимической и гидробиологической трансформации речных вод, играющий роль своеобразного «биофильтра».

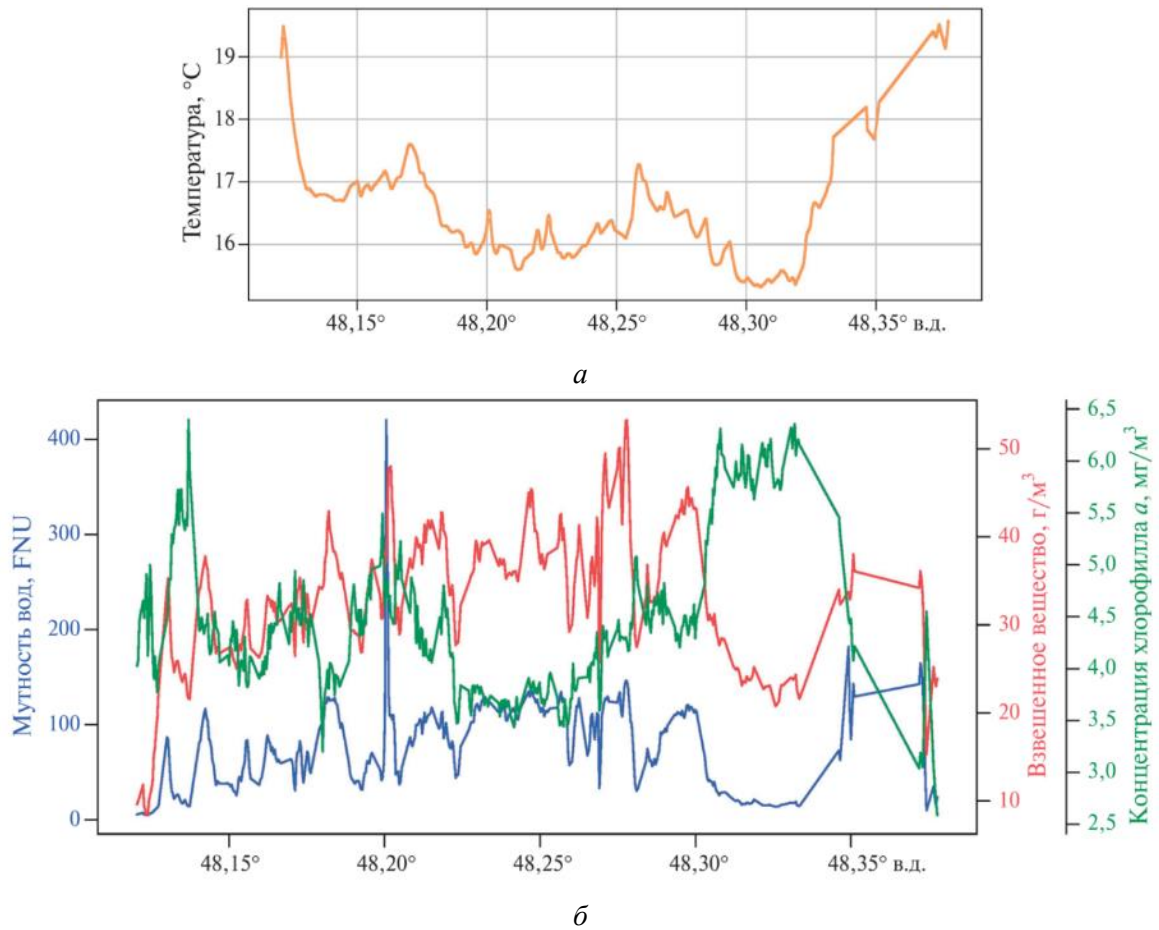


Рисунок 4.2.1.2 — Температура поверхности воды (°C) (а); общее содержание взвешенного вещества ( $\text{г}/\text{м}^3$ ) (красная линия), мутность вод (FNU), вычисленная с помощью алгоритма Dogliotti (синяя линия), и концентрация хлорофилла *a* (зелёная линия) вдоль разреза по 45°36' с.ш. (см. положение разреза на рисунке 4.2.1.1а) (б)

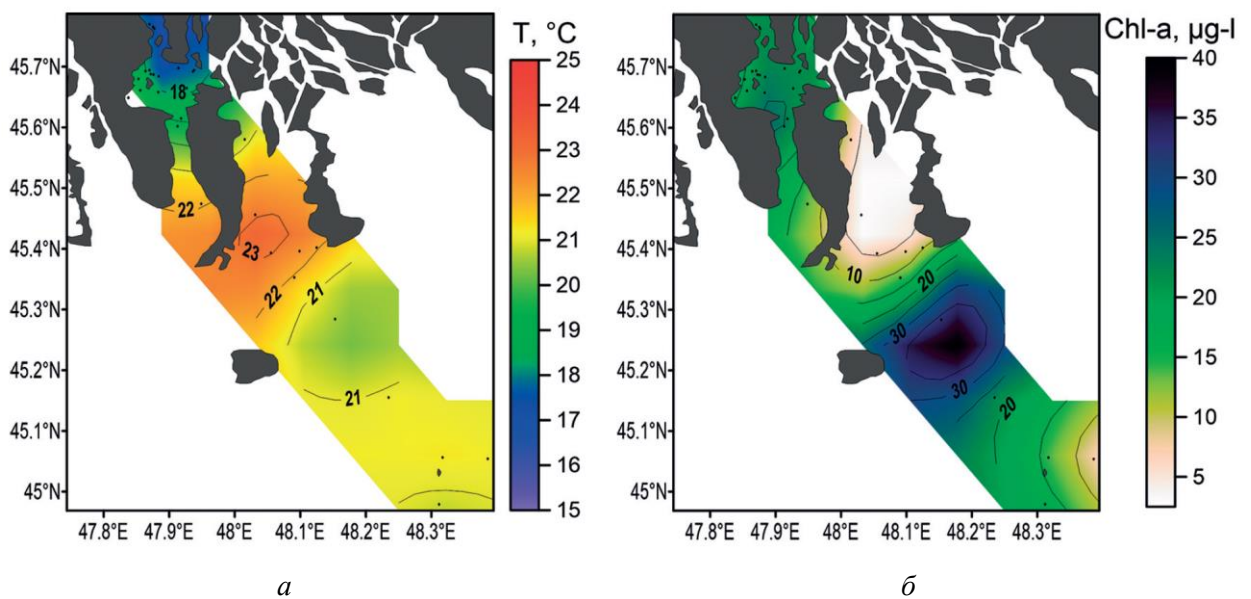


Рисунок 4.2.1.3 — Пространственное распределение температуры поверхности воды (а) и хлорофилла *a* (б) в районе юго-западной части дельты Волги по данным *in situ* измерений



Сравнение карт, построенных по натурным измерениям в дельте Волги (рисунки 4.2.1.3а, б) и по спутниковым данным (рисунки 4.2.1.4а, б), показало, что измерения *in situ* не дают даже близкого понимания о пространственной структуре течений в водотоках и могут приводить к ошибочным заключениям, поскольку они не отражают наличие чередующихся узких струй с существенно различающимися характеристиками гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров.

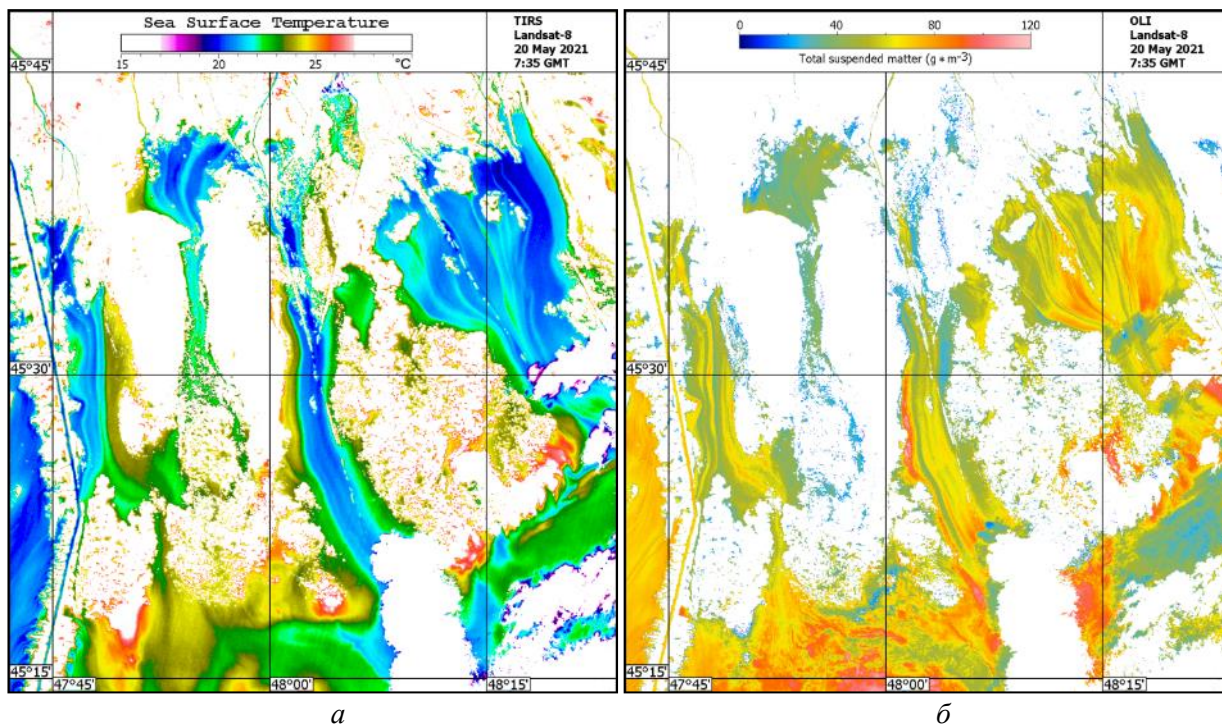


Рисунок 4.2.1.4 — Температура поверхности воды в Волге (°C) (а); концентрация взвешенного вещества ( $\text{г}/\text{м}^3$ ), полученные по данным OLI/TIRS Landsat-8 от 20 мая 2021 г. в момент проведения *in situ* измерений (б)

#### 4.2.2 Изменение параметров плюма реки Сулак (Каспийское море) после схода селевых потоков в горах Дагестана: спутниковые наблюдения и измерения *in situ*

Подспутниковые измерения параметров выноса р. Сулак в Каспийское море, проведённые со 2 по 7 июня 2023 г., позволили проследить изменение мутности воды и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне после поступления в море селевых масс. Сильные ливни в горах Дагестана привели 31 мая 2023 г. к образованию селевых потоков, которые попали, в частности, в р. Сулак. Через два дня, 2 июня, селевые массы вместе с речной водой попали в Каспийское море. В приустьевой зоне измеренная мутность воды превзошла 1000 FNU, что превышало допустимые значения измерительных приборов. Подспутниковые квазисинхронные измерения с маломерного судна проводились 2, 4, 5 и 7 июня с использованием различного океанологического оборудования. Они сопровождались взятием пробы воды для дальнейшего определения концентрации взвеси и её минерального состава. Выявленная линейная зависимость между мутностью воды и концентрацией взвешенного вещества позволила рассчитать мутность воды, которая не могла быть измерена *in situ*, она составила 1247 FNU при концентрации взвеси  $1097,4 \text{ г}/\text{м}^3$ . Спутниковые данные использовались для построения карт мутности на основе использования алгоритма Dogliotti (рисунки 4.2.2.1). Результаты спутниковых наблюдений и измерения *in situ* показали, что в течение двух суток мутность и концентрация взвешенного вещества на ближайшей к устью станции уменьшились в шесть раз и продолжали снижаться до средних для этого района в начале июня значений

(рисунок 4.2.2.2а). Минеральный состав взвеси, определённый с помощью рентгенофазного анализа сотрудниками геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, в день попадания селевых масс в море был представлен преимущественно глинистыми минералами, их содержание достигало 75 %. В дальнейшем, к 7 июня, минеральный состав взвеси стал соответствовать средним значениям для данного района, содержание глинистых минералов не превышало 44 % (рисунок 4.2.2.2б).

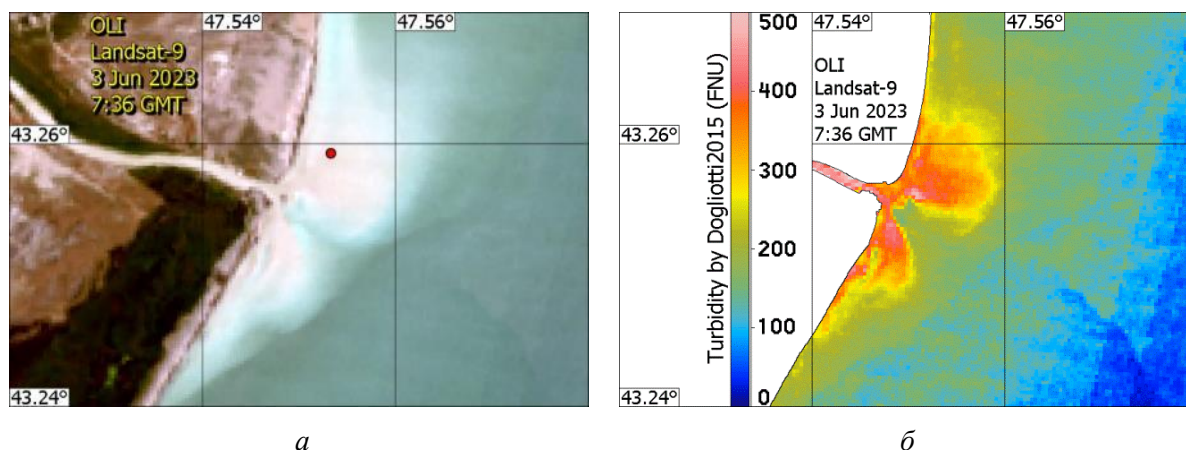


Рисунок 4.2.2.1 — Цветосинтезированное изображения (4-й, 3-й, 2-й спектральные каналы) OLI Landsat-9 плума р. Сулак (а). Кругом отмечено положение станции, на которой проводились измерения *in situ*; карта мутности, построенная с использованием алгоритма Dogliotti (б)

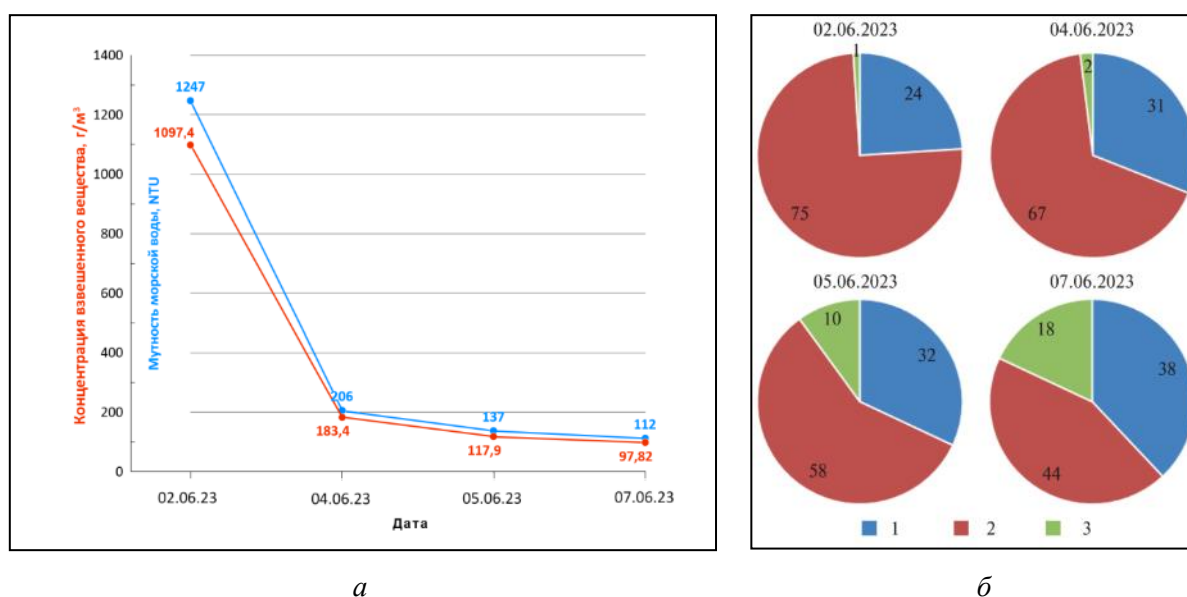


Рисунок 4.2.2.2 — Изменение концентрации взвешенного вещества и мутности воды в дни подспутниковых измерений на станциях вблизи устья р. Сулак (а); минеральный состав взвеси в приустьевой части плума в разные дни (б): 1 — безводные алюмосиликатные минералы: кварц, полевые шпаты, 2 — глинистые минералы: гидрослюда, смектит, каолинит, хлорит, смешанослойный слюда-смектит, 3 — карбонатные минералы: кальцит, доломит

#### 4.2.3 Комплексное использование спутниковых данных для мониторинга экологического состояния вокруг разведывательной буровой платформы в Карском море в июле – октябре 2023 г.

Работа выполнялась совместно с коллегами из Института океанологии им. П.П. Шишова РАН (ИО РАН), Москва



В середине июля 2023 г. между архипелагом Новая Земля и островом Белый в Карском море была установлена разведывательная буровая платформа, работа которой была завершена 19 октября. В период работы буровой платформы сотрудниками ИО РАН и ИКИ РАН проводился ежедневный комплексный спутниковый мониторинг окружающей акватории. Задачи спутникового мониторинга: выявление возможных поверхностных загрязнений, которые потенциально могли быть спровоцированы работами на платформе; определение ледовой обстановки в радиусе 300 км вокруг платформы; определение поверхностных проявлений гидрофизических процессов в районе платформы, характерных для данного времени года. Мониторинг базировался в первую очередь на ежедневных данных радиолокатора с синтезированной апертурой C-SAR спутника Sentinel-1A, а также безоблачных и малооблачных данных сенсоров MSI Sentinel-2, -2B; OLI/OLI-2 Landsat 8, -9, MODIS Aqua/Terra, VIIRS Suomi NPP. Анализ спутниковых данных проводился с помощью информационного спутникового сервиса See the Sea (STS), являющегося составной частью Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Ежедневные данные AMSR-2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) спутника GCOM-W1 о сплочённости льда использовались для сравнения с данными о ледовой обстановке, полученными при радиолокационном зондировании.

Результаты спутникового мониторинга показали следующее:

- никаких антропогенных загрязнений за время мониторинга обнаружено не было;
- в период интенсивного развития фитопланктона (конец июля – август 2023 г.) сликовые полосы были вызваны биогенными плёнками (рисунок 4.2.3.1), а не нефтяными загрязнениями;

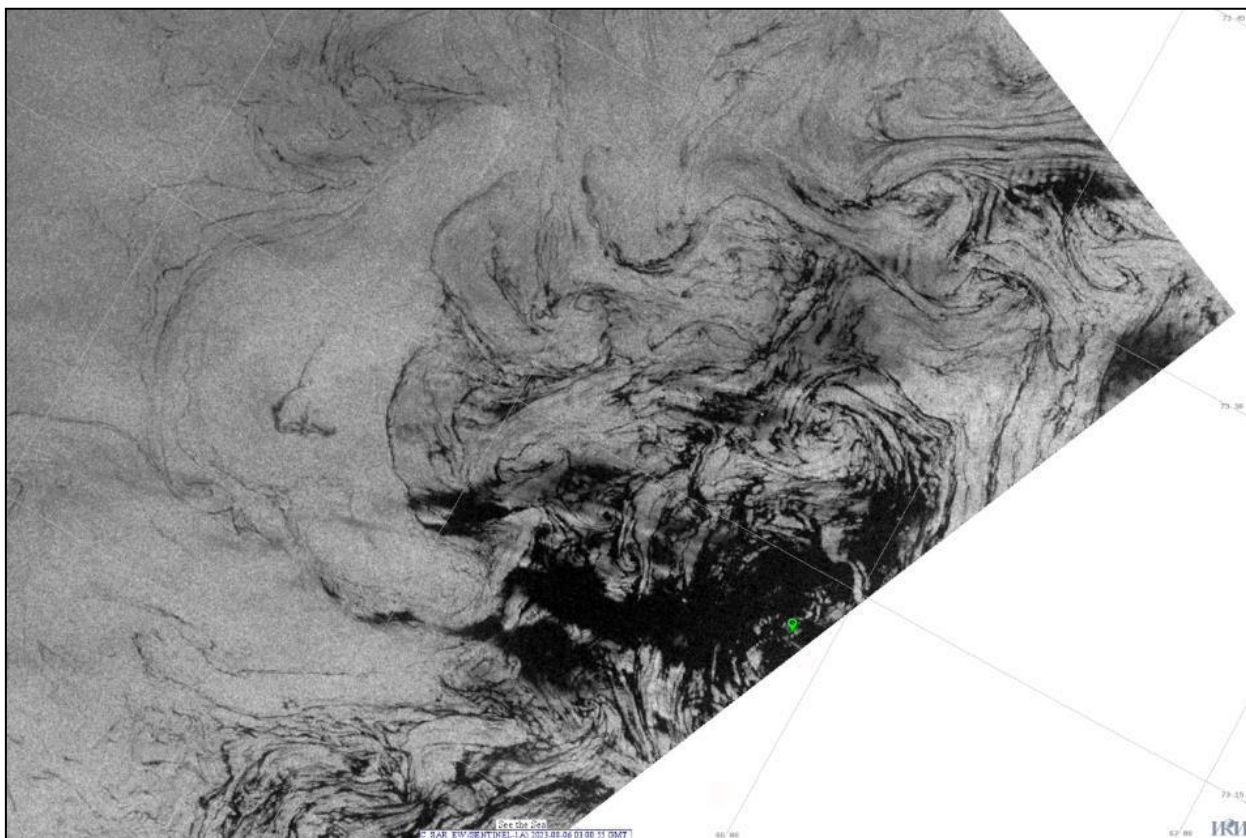


Рисунок 4.2.3.1 — Проявление вихревых процессов за счёт сликов, образованных плёнками поверхностно-активных веществ биогенного происхождения. Фрагмент радиолокационного изображения C-SAR Sentinel-1A, полученного 6 августа 2023 г. в 03:00 GMT на соосной ГГ (горизонтально-горизонтальной) поляризации. Зелёная метка соответствует положению платформы. Полярная система координат

- отдельные ледяные образования вблизи платформы на расстоянии 120–160 км были выявлены на спутниковых изображениях в начальный период мониторинга не позднее 25–27 июля (рисунок 4.2.3.2). В период до начала октября ледяные образования идентифицировались на расстоянии от 300 до 700 км от платформы. В конце октября (после проведения ежедневного мониторинга) лёд образовался вдоль побережья о. Белый и в проливах, на расстоянии менее 140 км.

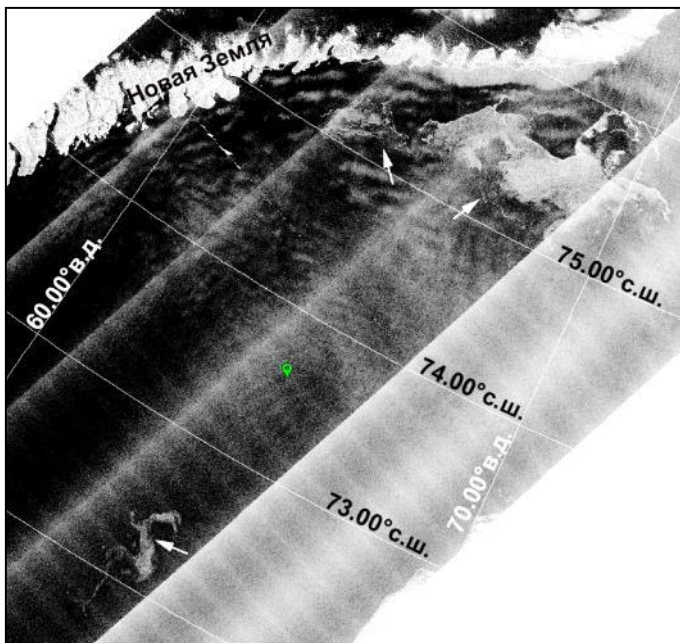


Рисунок 4.2.3.2 — Проявление ледяных образований вблизи платформы. Мозаика двух радиолокационных изображений C-SAR Sentinel-1A, полученных 15 июля 2023 г. в 02:43 и 02:44 GMT на перекрёстной ГВ (горизонтально-вертикальной) поляризации. Стрелки указывают на положение ледяных образований. Зелёная метка соответствует положению платформы. Полярная система координат

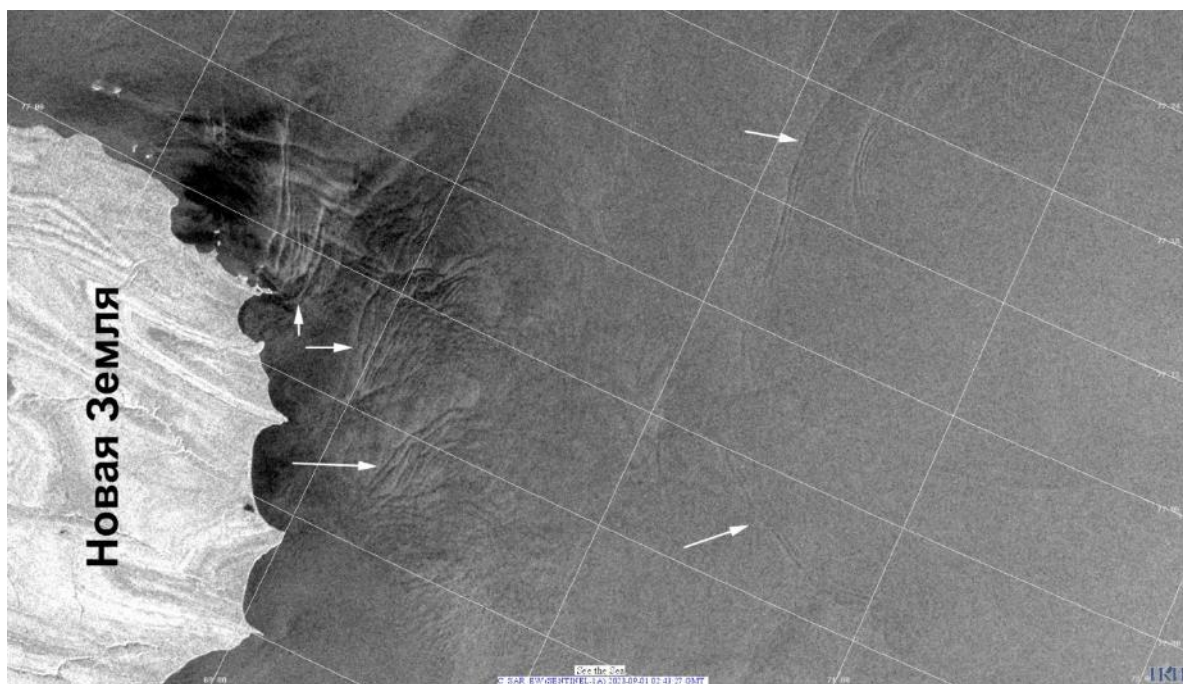


Рисунок 4.2.3.3 — Поверхностные проявления внутренних волн (отмечены стрелками) на радиолокационном изображении C-SAR Sentinel-1A, полученном 1 сентября 2023 г. в 02:43 GMT на соосной ГГ (горизонтально-горизонтальной) поляризации. Полярная система координат

- к основным гидрофизическим процессам, выявленным на спутниковых изображениях в районе платформы, относятся субмезомасштабные вихревые структуры, проявляющиеся за счёт как сликового, так и сдвигово-волнового механизмов визуализации (см. рисунок 4.2.3.1), а также внутренние волны.



Непосредственно в районе платформы поверхностные проявления внутренних волн наблюдались в единичных случаях, основное место их генерации и проявлений находится у северо-восточной оконечности архипелага Новая Земля (рисунок 4.2.3.3);

- данные о сплочённости льда, определённые AMSR-2 и представленные в интерактивной системе EOSDIS Worldview (*англ.* Earth Observing System Data and Information System, NASA) в некоторых случаях имели серьёзные расхождения с результатами спутниковых наблюдений с высоким пространственным разрешением. Например, по данным AMSR-2 в конкретном районе присутствовал лёд со сплочённостью выше 20 %, а по данным видимого диапазона и радиолокационным данным льда не было вообще на достаточно большой площади, и наоборот. Данное расхождение требует более подробного исследования.

#### **4.2.4 Развитие методических основ диагностики плёночных загрязнений морской поверхности по данным спутникового дистанционного зондирования в оптическом и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра**

На протяжении многих лет основной экологической проблемой Каспийского моря выступает нефтяное загрязнение, во многом обусловленное наличием крупных месторождений нефти и природного газа на морском дне. Наши предыдущие исследования показали, что естественные нефтепроявления (ЕНП) на морской поверхности, обусловленные просачиваниями нефте-углеводородов с морского дна на иранском и туркменском шельфах, вносят существенный вклад в общую картину загрязнения (7–10 % и 8–11 % соответственно). Кроме того, они выступают постоянно действующими источниками естественного загрязнения прилежащих к ним акваторий. Для выявления источников нефтяного загрязнения существует давно назревшая необходимость проведения спутникового мониторинга поверхности Каспийского моря, количественной оценки его масштабов и прогнозирования параметров дрейфа и растекания.

Проведённое нами исследование направлено на повышение надёжности дистанционного обнаружения естественных нефтепроявлений и восстановления их количественных оценок на основе совместного использования разнородных спутниковых данных. Оценена возможность повышения достоверности выявления и дальнейшего наблюдения ЕНП на морской поверхности при совместном применении данных спутниковых РСА СВЧ-диапазона и данных спутниковых многоканальных сенсоров оптического диапазона.

Таблица 4.2.4.1 — Проанализированные спутниковые данные

Сенсор	Временной промежуток	Количество изображений	
		Район м. Сефид Руд	Район п-ва Челекен
ASAR Envisat	Январь 2010 г. – март 2012 г.	39	77
SAR-C Sentinel-1A, -1B	Январь 2014 г. – декабрь 2020 г.	413	459
TM Landsat-5	Январь 2010 г. – август 2011 г.	17	28
MSI Sentinel-2A, 2B	Июль 2015 г. – декабрь 2020 г.	154	129
OLI/TIRS Landsat-8	Февраль 2014 г. – декабрь 2020 г.	71	108

Анализ спутниковых данных проводился с помощью информационного спутникового сервиса See the Sea (STS).

Тестовые районы — участки акватории Каспийского моря вблизи юго-западного побережья к востоку от м. Сефид Руд в провинция Гилян, Иран (1) и к западу от п-ва Челекен, административно принадлежащего Туркменистану (2) отмечены на

рисунке 4.2.4.1 красными прямоугольниками. В этих районах на основе спутниковых данных нами ранее были идентифицированы нефтесодержащие донные сипы, т.е. места просачивания естественных нефте-углеводородов с морского дна в толщу морских вод.



Рисунок 4.2.4.1 — Основные районы интереса

В ходе проведённого исследования для двух тестовых районов нами определены коэффициенты выявляемости ЕНП в спутниковых изображениях, полученных различными сенсорами, определяемые как количество спутниковых изображений, несущих отчётливые сигнатуры ЕНП, выраженное в процентах к общему числу изображений, полученных за рассматриваемый период для конкретного района (рисунок 4.2.4.2).

Установлено, что в течение всего периода исследований среднемесячный коэффициент выявляемости в различные месяцы года обладал высокой изменчивостью, особенно для данных многоспектральных сенсоров, где этот коэффициент варьировал от нуля в зимние месяцы до 80% – в летние. При этом среднегодовой коэффициент выявляемости естественных нефтепроявлений, определенный по всей совокупности спутниковых изображений, варьировал в достаточно узких пределах 33–50% для района мыса Сефид Руд и 47–60% для района полуострова Челекен.



Рисунок 4.2.4.3 — Межгодовая изменчивость коэффициента выявляемости нефтепроявлений на морской поверхности, в районе м. Сефид Руд (слева) и п-ва Челекен (справа)

Показано, что совместное использование данных спутниковых РСА и многоспектральных сенсоров оптического диапазона может повысить обнаруживаемость плёнок ЕНП на морской поверхности, особенно в тёплое время года.

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

### 4.3.1 Апробация методов выявления пространственной и временной изменчивости траекторий естественных нефтепроявлений на морской поверхности Южного Каспия на основе многолетних рядов данных спутникового дистанционного зондирования

Отсутствие или недостаток полевых измерений становится на данный момент пробелом в восстановлении полной картины течений Каспийского моря, особенно в районах континентального шельфа. Долговременные спутниковые наблюдения траекторий распространений естественных нефтепроявлений (ЕНП) на морской поверхности предоставляют новую информацию о полях течений и предоставляют возможности для валидации смоделированных полей течений. В проведённом нами исследовании многолетние ряды данных спутникового дистанционного зондирования морской поверхности, полученных в районах выхода естественных нефте-углеводородов с морского дна, используются в качестве экспериментальной основы при решении задачи выявления поверхностных течений, преобладающих в районах интереса. Опосредованным параметром являются траектории распространения плёнок ЕНП.

Проанализированы долговременные ряды спутниковых данных, накопленных за пятилетний период с января 2017 г. по декабрь 2021 г., включающие в себя данные микроволнового диапазона радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) C-SAR ИСЗ Sentinel-1A, -1B, и данные, полученные в видимом диапазоне при помощи многоспектральных сенсоров MSI ИСЗ Sentinel-2A, -2B и сканирующего радиометра OLI ИСЗ Landsat-8 при облачном покрытии, не превосходящем 10 % (рисунок 4.3.1.1).

Районы интереса – участки акватории Каспийского моря вблизи юго-западного побережья к востоку от м. Сефид Руд (провинция Гилан, Иран) и к западу от п-ва Челекен, административно принадлежащего Туркменистану, где на основе спутниковых данных нами ранее были идентифицированы нефтесодержащие донные сипы. Положение этих районов на карте показано выше на рисунке 4.2.4.1.

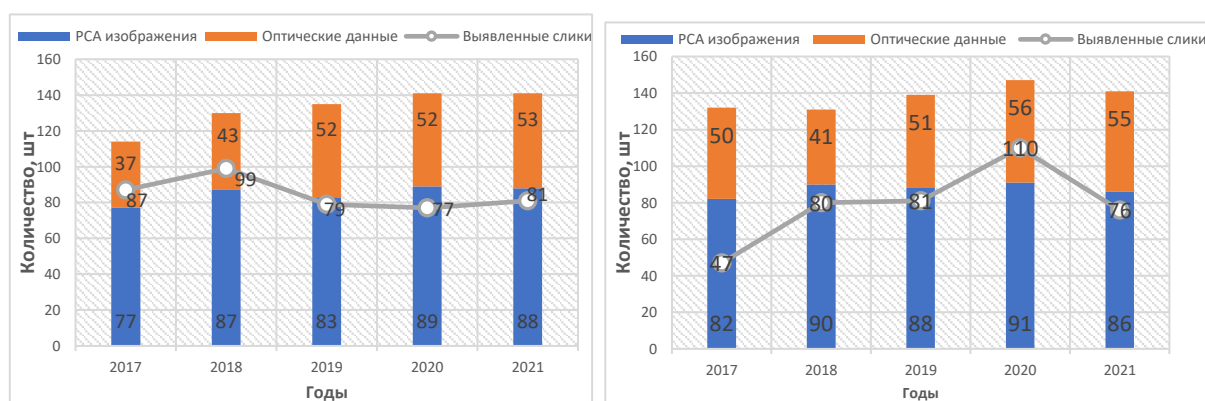


Рисунок 4.3.1.1 — Межгодовое распределение проанализированных спутниковых изображений и выявленных на них ЕНП для районов м. Сефид Руд (слева) и п-ва Челекен (справа)

В общей сложности было проанализировано 661 спутниковое изображение поверхности Каспийского моря над иранским шельфом в районе м. Сефид Руд и 690 спутниковых изображений морской поверхности в районе п-ва Челекен. Для анализа спутниковых данных, построения карт нефтяного загрязнения морской поверхности и распределения вероятностей применялся инструментарий и картографический интерфейс информационного спутникового сервиса See the Sea (STS).

**Определены характерные типы траекторий распространений ЕНП** на морской поверхности для двух районов интереса и сделаны предположения о механизмах их формирования. Просачивающаяся с морского дна нефть, достигая поверхности, формирует на ней тонкую плёнку — нефтяной слик ЕНП, дрейф и растекание которого определяются совместным воздействием ветра и поверхностных течений. Наличие поверхностной плёнки приводит к понижению интенсивности волно-ветрового взаимодействия и к затуханию резонансной гравитационно-капиллярной компоненты поверхностного волнения. Вследствие этого плёночные слики проявляются на радиолокационных изображениях, полученных спутниковыми РСА, как области пониженного рассеяния, служат индикаторами наличия на поверхности нефтяной плёнки. На изображениях, цветосинтезированных по данным сенсоров оптического диапазона, особенно полученных в области солнечного блика, ЕНП видны как характерные радужные структуры повышенной яркости, окружённые тёмным ореолом. Форма сликов на поверхности моря и пространственные вариации распространения естественных нефтепроявлений на морской поверхности определяются вариациями поля поверхностных течений и приповерхностного ветра. Отдельное внимание уделено эллиптическим траекториям распространения ЕНП, подобным тем, что приведены на рисунке 4.3.1.2.

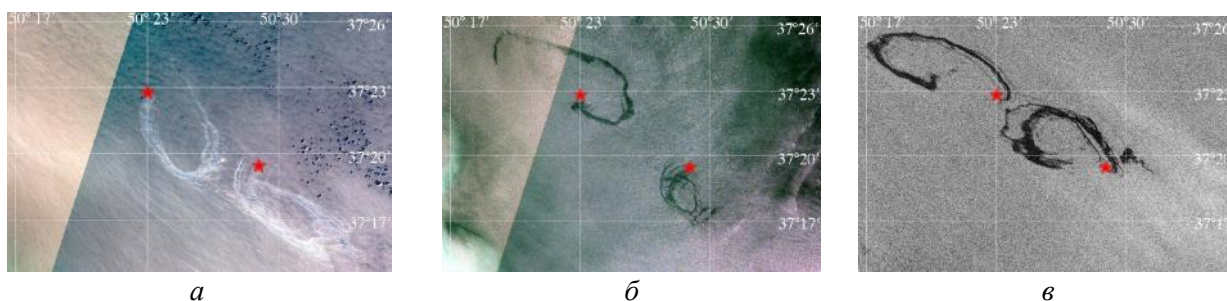


Рисунок 4.3.1.2 — Фрагменты спутниковых изображений, отображающих эллиптические траектории распространения ЕНП на морской поверхности: *а* — MSI Sentinel-2A от 30 июня 2018 г., 07:38 GMT; *б* — MSI Sentinel-2A от 6 мая 2019 г., 07:38 GMT; *в* — SAR-C Sentinel-1A от 21 апреля 2021 г., 14:36 GMT. Красными звёздочками отмечено положение точек всплытия ЕНП на поверхность моря

Траектории этого типа детектировались нами на спутниковых изображениях морской поверхности в районе м. Сефид Руд в течение всего пятилетнего периода наблюдений в тёплое время года — с последних чисел апреля до конца августа. Такая форма траекторий распространения ЕНП может быть следствием воздействия инерционных колебаний, которые существуют за счёт действия сил инерции после прекращения основной силы, вызывающей движение вод, и характерны именно для естественных просачиваний с морского дна, когда нефть медленно выделяется в течение некоторого времени из фиксированной точки на дне моря. После ослабления внешнего воздействия эти колебания устанавливаются, и для их поддержания внешнее воздействие уже не требуется. Колебания такого рода могут возбудиться под влиянием внешнего воздействия, чаще всего ветрового импульса. Как форма, так и период этих колебаний могут испытывать значительные изменения вблизи крутых склонов дна и под влиянием сильных и неоднородных в пространстве течений. Возникновение круговых и эллиптических траекторий именно в тёплое время года может быть связано с формированием сезонного термоклина, способствующего интенсификации подобных колебаний.

**На основе спутниковых данных обнаружены значительная сезонная и пространственная изменчивости** в направлениях распространения ЕНП в обоих тестовых районах, обусловленные влиянием локальных ветров и поверхностных течений, преобладающих в различные сезоны. В частности, показано, что в районе туркменского шельфа в холодный сезон с декабря по март направления траекторий ЕНП достаточно



вариативны, однако преобладают юго-западное и западное направления. С апреля по май доминирующим становится южное направление, затем доминирующее направление медленно изменяется, совершая поворот против часовой стрелки, меняясь с южного на северо-восточное и затем на северо-западное (рисунок 4.3.1.3).

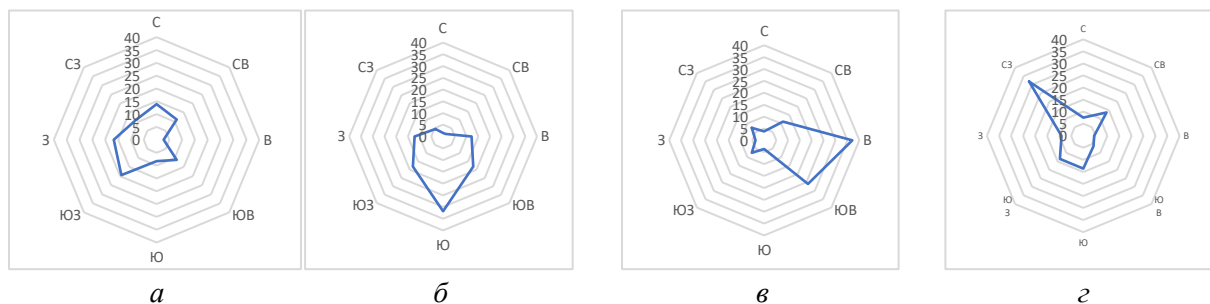


Рисунок 4.3.1.3 — Диаграммы распределения направления дрейфа плёнок ЕНП на морской поверхности в районе п-ва Челекен по результатам спутниковых наблюдений в различные месяцы за пятилетний период наблюдений: *а* — декабрь – март; *б* — апрель – июнь; *в* — июль; *г* — август – ноябрь

В районе м. Сефид Руд наблюдается выраженная пространственная асимметрия области акватории, потенциально подверженной нефтяному загрязнению (см. рисунок 4.3.1.4*а*). На большом временном интервале существует доминирующее направление распространения ЕНП. В 60 % случаев ЕНП после выхода на поверхность распространялись в юго-восточном направлении ( $112\text{--}157^\circ$ ). На основе анализа спутниковых данных мы выявили, что во все годы наблюдения присутствует сезонная изменчивость в направлениях распространения плёнок ЕНП. Наличие сезонной изменчивости в направлениях траекторий распространения плёнок ЕНП в этом районе наглядно отражают диаграммы, построенные по данным за январь и декабрь, накопленным за весь период 2017–2021 гг. и по данным за май, накопленным за тот же период времени (см. рисунок 4.3.1.4. *б*, *в*). Более 80 % ЕНП, выявленных в декабре – январе за пять лет наблюдений, распространялись в юго-восточном направлении. Траектории распространения ЕНП, выявленных за тот же период наблюдений в мае, отличаются большим разнообразием.

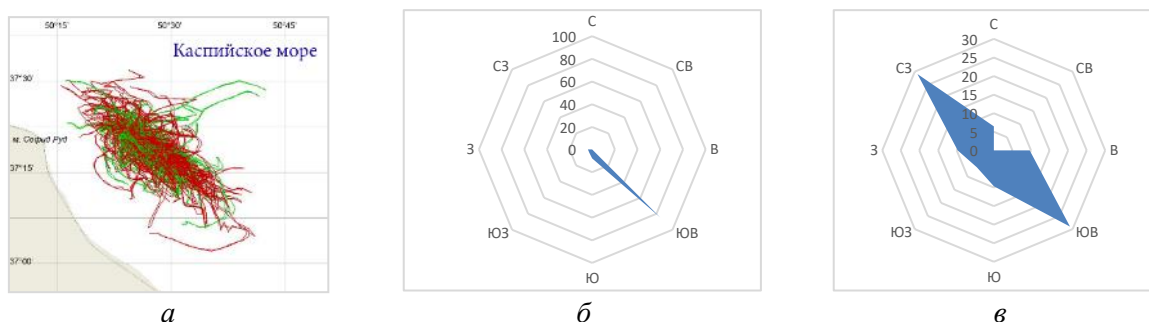


Рисунок 4.3.1.4 — Сводная карта ЕНП на поверхности Каспийского моря, выявленных по спутниковым данным за 2017–2021 гг. вблизи м. Сефид Руд (*а*); диаграммы распределения направлений дрейфа плёнок ЕНП на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений в различные месяцы 2017–2021 гг.: *б* — декабрь – январь; *в* — май

Выявленные сезонные и пространственные изменчивости должны учитываться при оценке рисков нефтяного загрязнения морской поверхности и побережья.

**Рассмотрено влияние мезо- и субмезомасштабных процессов** на траектории распространения ЕНП. В периоды ослабления течений и при умеренных ветрах влияние мезо- и субмезомасштабных процессов на траектории распространения ЕНП усиливается и становится первостепенным фактором. Траектории дрейфа плёнок ЕНП существенно

усложняются, если по мере своего распространения они вовлекаются в вихревые движения, обусловленные присутствием в районе интереса вихрей разных знаков или вихревых диполей, и распространяются этими течениями на достаточно большие расстояния. Длина траектории ЕНП, вовлечённого в вихревые движения, может достигать 40–45 км. Показано, что в 10–12 % случаев ЕНП после выхода на поверхность оказываются вовлечёнными в вихревые движения и могут распространяться на большие расстояния, способствуя кроссшельфовому переносу нефтяного загрязнения. При этом в районе вблизи иранского побережья вероятность переноса ЕНП вихрями в сторону глубоководной части выше, чем в сторону береговой черты. В районе туркменского побережья вероятности переноса плёнок ЕНП, вовлечённых в вихревые движения, в сторону побережья и в сторону глубоководной части моря примерно одинаковы.

#### ***4.3.2 Апробация методов выявления пространственной и временной изменчивости субмезомасштабных вихревых процессов в оз. Севан на основе многолетних рядов данных спутникового дистанционного зондирования***

Озеро Севан — единственный крупный гарантированный источник пресной воды в Армении и крупнейший на всём Кавказе. В связи с этим с давних времён ставилась задача об эффективном использовании водных ресурсов озера. Озеро Севан делится на две части: Малый Севан (западный) и Большой Севан (восточный). Малый Севан отличается большей глубиной и изрезанными берегами. Именно в этой части сосредоточен больший объём воды озера. В Большом Севане дно ровное, берега мало изрезаны, глубина не превышает 30 м. Основные экологические проблемы оз. Севан следующие: падение уровня воды; зарастание прибрежной зоны; интенсивное развитие фитопланктона (в первую очередь цианобактерий), связанное во многом с поступлением в воду большого количества биогенных элементов вследствие затопления неочищенных берегов при повышении уровня озера, неочищенных сточных вод сельхозугодий и животноводческих ферм и т.д.; вынос мутных вод реками и с береговыми стоками (заводы и добыча цемента и песка по берегам). Поскольку подавляющее большинство антропогенных загрязнений водной акватории происходит с берегов, особенно в Большом Севане, важно понимать, какие процессы определяют водообмен этой зоны с глубоководной частью озера. Как показали исследования коллег из ИО РАН, внутрибассейновый горизонтальный водообмен осуществляется интенсивной вихревой динамикой.

Большие размеры озера — площадь составляет в настоящее время примерно 1240 км<sup>2</sup> — и расположенность в труднодоступной местности определяет необходимость спутникового мониторинга. Более 250 безоблачных дней в году позволяет активно использовать оптические данные.

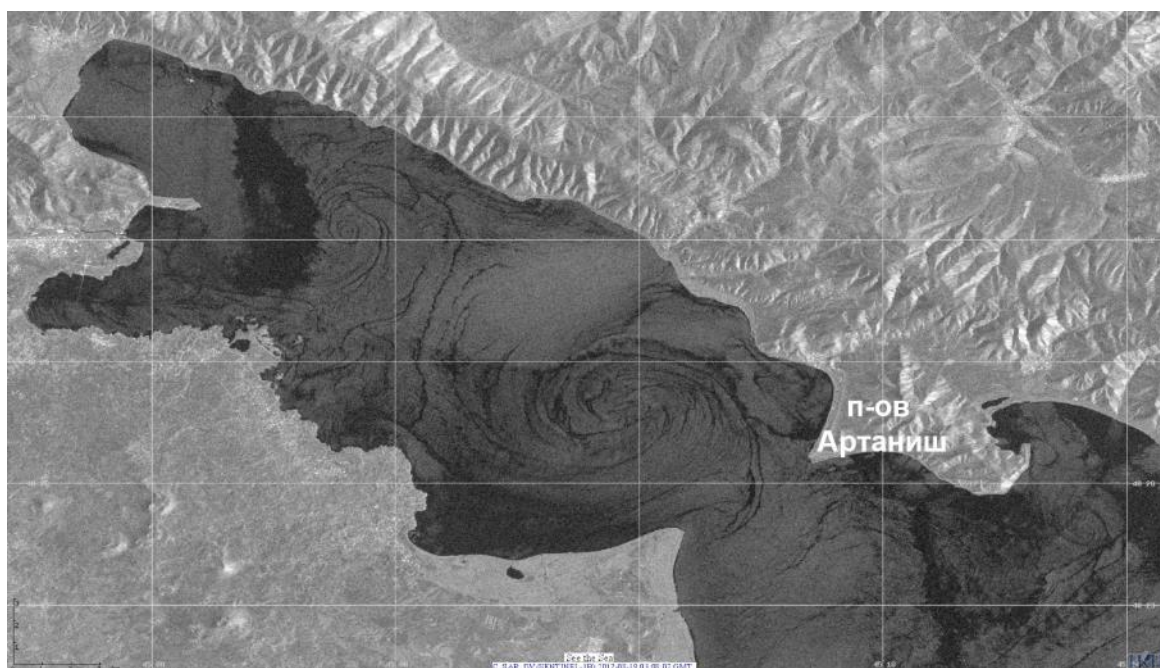
В 2023 г. нами на основе спутниковых данных за 2016–2023 гг. было проведено исследование пространственной и временной изменчивости субмезомасштабных вихревых процессов в оз. Севан. Задача состояла в том, чтобы на основе длинных рядов данных спутникового зондирования в различных диапазонах электромагнитного спектра определить частоту проявления вихревых процессов на спутниковых изображениях, определить их характерные размеры, основные места генерации и проявления, а также определить, какие из использованных данных наиболее подходят для решения поставленных задач.

С помощью инструментария информационной системы STS были проанализированы более 1000 радиолокационных изображений (РЛИ) прибора C-SAR Sentinel-1 и около 500 видимых изображений MSI Sentinel-2 и OLI/OLI-2 Landsat-8, -9, полученных при облачном покрове не более 20 %.

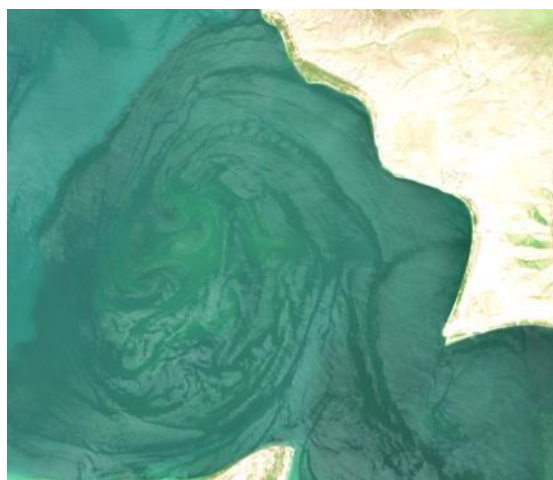
Результаты комплексного анализа спутниковых изображений позволили сделать следующие выводы:

- трассерами вихревых процессов на РЛИ являлись слики, образованные биогенными плёнками (рисунки 4.3.2.1a, 4.3.2.2a), на изображениях видимого

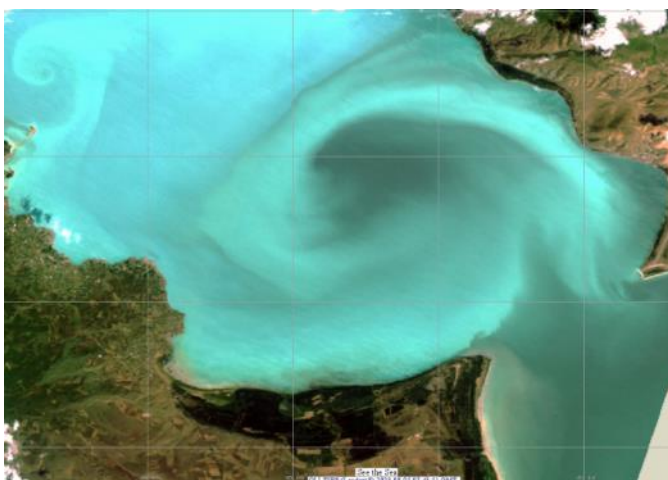
диапазона — повышенная концентрация фитопланктона (рисунки 4.3.2.1а, 4.3.2.2б) или, если изображение попадает в зону солнечного блика, — слики от биогенных плёнок (рисунок 4.3.2.1б). Вследствие этого проявления вихревых процессов на спутниковых изображениях наблюдаются с конца апреля по конец октября;



*а*



*б*



*в*

Рисунок 4.3.2.1 — Проявления вихревых структур в Малом Севане: *а* — на РЛИ C-SAR Sentinel-1B от 19 августа 2017 г.; *б* — на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A от 14 августа 2022 г. Трассеры — биогенные пленки; *в* — на цветосинтезированном изображении OLI Landsat-8 от 5 августа 2023 г.

- практически на каждом безоблачном или малооблачном изображении видимого диапазона наблюдаются вихревые структуры; на РЛИ в среднем 5–6 раз в месяц. Проявление сликов на РЛИ напрямую зависит от скорости приводного ветра: при штиле или слабом или, наоборот, при сильном ветре (более 8–9 м/с) они не проявляются, следовательно, нет проявлений вихрей;
- в Малом Севане циклонические вихри или вихревые диполи наблюдались северо-западнее п-ва Артаниш, который находится на границе между Малым и Большим Севаном (см. рисунок 4.3.2.1), в Большом Севане в основном

наблюдался устойчивый циклонический круговорот, иногда с присоединёнными вихревыми диполями, продолжительность «жизни» которого составляла несколько суток (см. рисунок 4.3.2.2). На РЛИ, как правило, вихри в Большом Севане наблюдались не целиком;

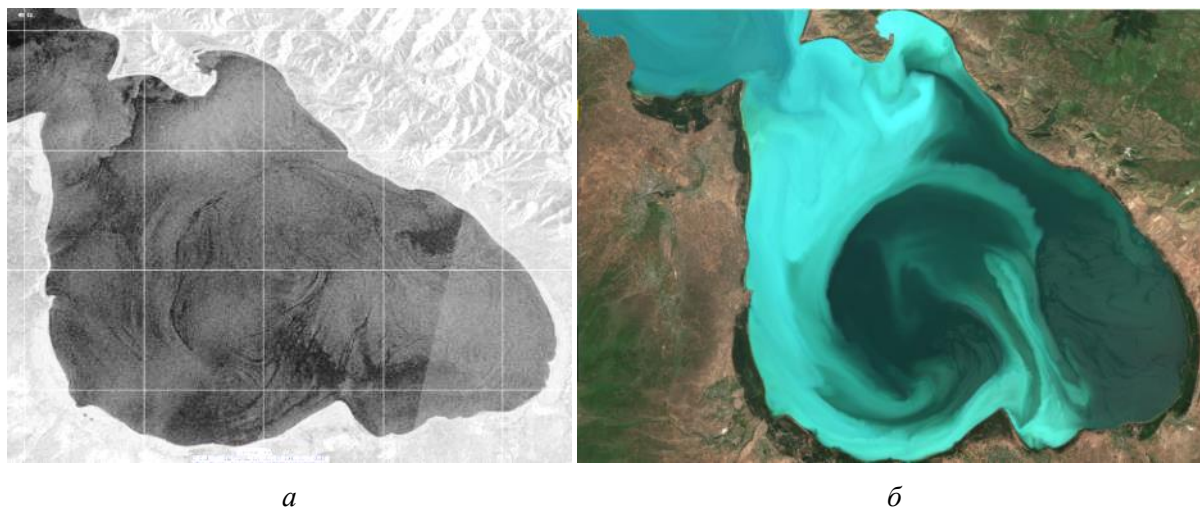


Рисунок 4.3.2.2 — Проявления вихревых структур в Большом Севане: *а* — на РЛИ C-SAR Sentinel-1A от 30 сентября 2023 г.; *б* — на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A от 14 августа 2023 г.

- характерные размеры вихревых структур: в Малом Севане менее 8 км в диаметре, в Большом — порядка 20–25 км;
- ни один вид спутников данных не даёт информацию о полной картине вихревой активности в о. Севан. Необходимо применять только комплексный подход.

## 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 радиолокационных и оптических спутниковых сенсоров для оценки экологического состояния морских акваторий.
- Развитие методов анализа временных рядов данных ДЗЗ для количественной оценки параметров процессов в верхнем слое океана и в придном слое атмосферы.

Таким образом материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Океан» в 2023 г. выполнены в полном объёме.



## РАЗДЕЛ 5 МОНИТОРИНГ-АТМОСФЕРА

### Введение

Направления работ по разделу Мониторинг-Атмосфера в 2023 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 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.

Основные результаты проведённых по темам в 2023 г. работ кратко представлены в настоящей главе отчёта.

Полученные в 2023 г. результаты подробно изложены в списках публикаций в иностранных и российских журналах, а также в материалах различных конференций, проходивших в 2023 году, приведённых в конце отчёта [4–7, 21, 36, 37, 42, 49–51, 57, 94–96, 110–112, 114, 116, 135–137].

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

#### ***5.1.1 Исследование регионального гидрологического баланса на основе технологий и систем спутникового мониторинга***

В рамках работы по теме «Мониторинг» в 2023 г. был предложен новый подход к анализу элементов регионального гидрологического баланса на основе данных спутникового радиотеплового мониторинга Земли. Изменения параметров гидрологического цикла являются одними из важных следствий и индикаторов региональной и глобальной климатической изменчивости. Развитие методов расчёта и прогнозирования изменений этих параметров представляют интерес не только с фундаментальной, но и с научно-прикладной точки зрения. Увлажнение территории и его динамика обуславливают как текущее состояние, так и возможную трансформацию экосистемы; во многом определяют величину речного стока, как компоненты гидрологического цикла, при формировании специфических погодных условий создают риски развития наводнений или засух. Существует два основных методических подхода к оперативному и долгосрочному анализу компонент гидрологического цикла: на базе прямых изменений аэрологических станций и с помощью оценок по реанализу. Очевидным недостатком первого подхода, в общем случае, является редкость и неравномерность измерений по пространству. Второй подход опирается на процедуру усвоения данных разнородных измерений в сложных циркуляционных моделях, и его результаты нуждаются в проверке с использованием репрезентативных объёмов независимых фактических наблюдений. Предлагаемый подход, основан на вычислительной схеме, замкнутой относительно данных спутникового радиотеплового мониторинга. Его результаты, таким образом, можно считать в значительной степени независимыми от двух других подходов (при известных, сделанных ниже оговорках) и опирающимися исключительно на данные фактических

(дистанционных) наблюдений. Такой подход обладает рядом преимуществ: высокая оперативность при малых затратах вычислительных мощностей, глобальный охват земного шара с высоким пространственным и временным разрешением, потенциальная возможность обнаружения новых эффектов и явлений, которые не могут быть воспроизведены метеорологическими моделями. Элементы гидрологического баланса за определённый интервал времени для произвольной площади можно вычислить с помощью уравнения баланса:

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} (E - P) dt = - \iint_A Q(x, y) dx dy \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint_l \bar{F}_a(x, y) dx dy ,$$

где  $E$  — испарённая влага за период времени  $dt$ ;  $P$  — осаждаемая влага за период времени  $dt$ ;  $Q$  — интегральное влагосодержание атмосферы;  $\bar{F}_a$  — интегрированный по высоте поток атмосферной влаги. Соответственно, для вычисления гидрологического баланса за некоторый период времени в заданной области необходимо знать изменение количества влаги между начальным и конечным моментом времени в заданной области и суммарную конвергенцию влаги в область за период времени. Предложенное решение задачи восстановления интегрального влагосодержания по данным радиотепловых спутниковых измерений на базе технологии искусственных нейронных сетей описано в разд. 5.5 настоящего отчёта. Ниже обсуждена технология восстановления конвергенции горизонтальных потоков водяного пара по восстанавливаемым полям интегрального влагосодержания (PWV). Для расчёта конвергенции внутрь области необходимо знать горизонтальные потоки водяного пара, которые получаются перемножением PWV на каждом элементе границы области  $A$  на скорость горизонтального переноса водяного пара. Для восстановления горизонтального переноса водяного пара из спутниковых радиотепловых измерений PWV была разработана отдельная методика. Суть методики состоит в вычислении такого поля скорости горизонтального переноса, которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию полей интегрального влагосодержания, выстроенных в хронологическом порядке, при дополнительных ограничительных требованиях (непрерывности, гладкости). Реализующие такой подход алгоритмы в системах технического зрения получили название «анализа оптического потока». При работе был использован алгоритм DIS (Dense Inverse Search), как наиболее развитый и адекватный задаче. Было проведено сравнение горизонтальных потоков водяного пара, восстановленных по разработанной методике, и реанализу ECMWF Era5 (рисунок 5.1.1.1). Соответствие между потоками, полученными по разработанной методике и реанализа для зональных компонент достаточно высокое, корреляция между ними около 0,7. Для меридиональных компонент потока водяного пара корреляция с реанализом Era5 слабая. Главным образом это обусловлено тем, что наиболее активное перемещение водяного пара в атмосфере происходит в зональном направлении в соответствии с общей структурой глобальной циркуляции атмосферы, поэтому зональная компонента движения лучше определяется алгоритмами оптического потока, и для неё соотношение сигнал/шум оказывается гораздо выше. Минимизация ошибок оценки скорости горизонтального переноса водяного пара — предмет дальнейших исследований. Таким образом, предложенный подход предлагает новую схему анализа водного баланса территорий, замкнутую на данных спутникового микроволнового зондирования Земли, и включает в себя следующие этапы:

- 1) расчёт общего количества водяного пара ( $\sum_s PWV$ ), содержащегося над заданной областью, в течение рассматриваемого интервала времени;
- 2) расчёт эффективной конвергенции/дивергенции вертикально-интегрированного горизонтального потока водяного пара, прошедшего через внешние контуры области за рассматриваемый интервал времени;
- 3) решение уравнения водного баланса атмосферы, в котором недостаток/избыток водяного пара в конечный момент времени по сравнению с зарегистрированным

ранее обусловлен разностью между выпавшей в виде осадков и испарившейся с данной территории влагой («эффективное увлажнение»).

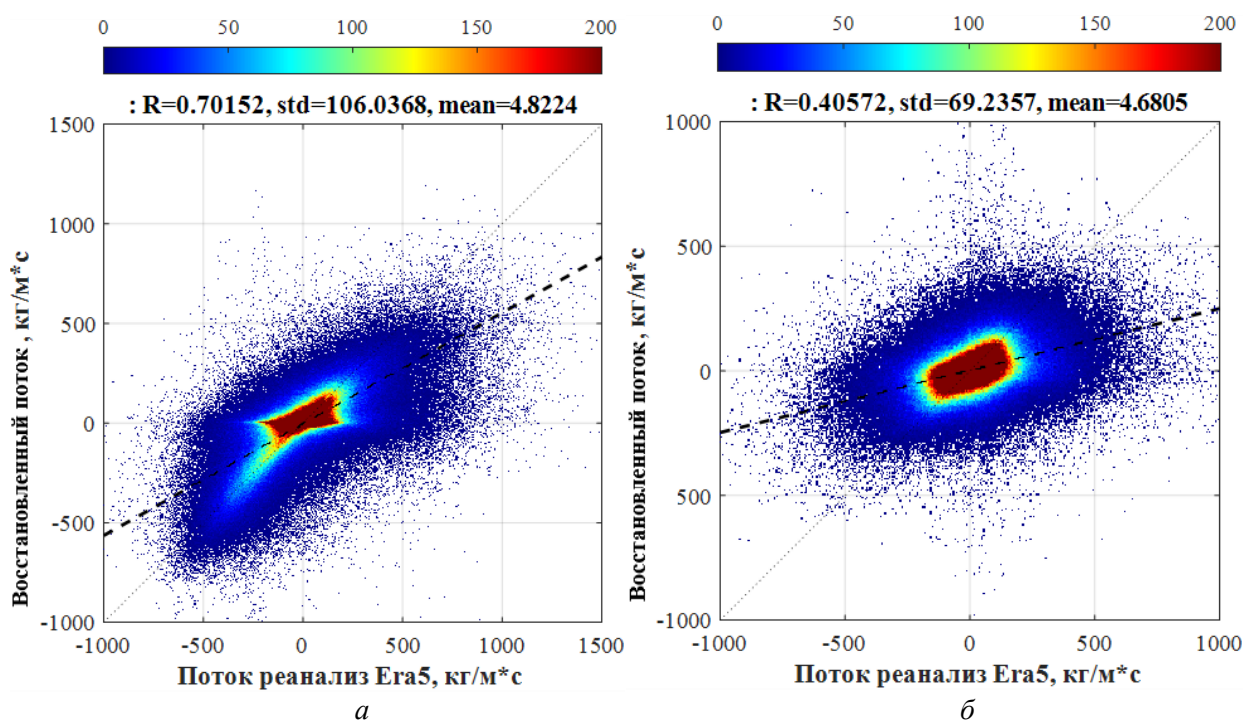


Рисунок 5.1.1.1 — Сравнение потоков водяного пара, восстановленных по радиотепловым измерениям и реанализу ECMWF Eга5: *а* — для зональной компоненты; *б* — меридиональной компоненты. Цветом обозначено число пар соответствующих значений (цветовая шкала — сверху)

### 5.1.2 Воздействие внутренних гравитационных волн на ионосферу во время активной стадии тропического циклона

Во время прохождения тропических циклонов с помощью спутников SWARM были обнаружены возмущения электронной плотности в верхней ионосфере. Просвечивание в радиодиапазоне на сверхдлинных волнах, экспериментально осуществляемое с помощью региональной сети дальневосточных станций, позволило одновременно исследовать реакцию нижней ионосферы на те же события. Показано, что активная фаза тропического циклона приводит к возмущениям амплитуды и фазы сверхдлинноволнового сигнала, параметры которых соответствуют внутренним гравитационным волнам (ВГВ) в атмосфере. Механизм воздействия ВГВ на ионосферу следующий: генерируемые во время тропического циклона ВГВ приводят к волновым возмущениям плазмы в нижней части F-области; возникающие при этом поляризациянные поля проецируют электрифицированные волновые структуры вдоль силовых линий геомагнитного поля как в нижнюю ионосферу, вызывая изменение фазы сверхдлинноволнового сигнала вдоль трассы распространения, так и в верхнюю ионосферу, вызывая там изменения электронной плотности.

### 5.1.3 Восстановление интенсивности осадков по данным микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ

Для восстановления интенсивности осадков с помощью радиометрии применяются различные алгоритмы. Они делятся на три основных класса. К первому классу относятся алгоритмы, которые используют низкочастотные радиометрические каналы (порядка 10–40 ГГц). В этом диапазоне частот наличие гидрометеоров приводит к увеличению излучения системы «океан—атмосфера», и это увеличение излучения связывают с

интенсивностью осадков. Алгоритмы второго класса используют радиометрические каналы высокочастотной группы (порядка 90 ГГц). На этой частоте наличие гидрометеоров приводит к уменьшению радиоизлучения (т.е. рассеяние восходящего радиоизлучения). Третий класс называется «многоканальная инверсия», в нём используется комбинирование первых двух классов. Интенсивность осадков по второму классу алгоритмов восстанавливается посредством расчёта индекса рассеяния  $SI$ . Индекс рассеяния для частоты 91,65 ГГц вертикальной поляризации ( $V$ ), может быть записан как  $SI = F - T_{91,65}^V$ , где  $F$  — это функция, выраженная в виде суммы с весовыми коэффициентами радиоярких температур на частотах отличных от 91,65 ГГц, и характеризующая, каким могло бы быть излучение на частоте 91,65 ГГц в отсутствие рассеяния.  $T_{91,65}^V$  — радиояркая температура на частоте 91,65 ГГц вертикальной поляризации. На основе анализа данных МТВЗА-ГЯ была подобрана функция  $F$ , которая описывает, каким могло бы быть излучение в отсутствие рассеяния на частоте 91,65 ГГц. Для построения зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния  $SI$  использован реанализ GPM IMERG (англ. Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurements). Было проведено совмещение измерений МТВЗА-ГЯ с данными GPM IMERG. Совмещение проводилось по времени. Разница между данными реанализа и измерениями составила не более  $\pm 15$  мин. Для анализа взяты данные с временным расхождением не более  $\pm 1$  мин. Были проанализированы все данные МТВЗА-ГЯ, полученные за 2020 г. (с 1 февраля по 31 декабря). Выбирались области с осадками площадью не менее 100 пикселей (при сетке  $0,25^\circ$ ). Всего было выделено 3448 областей для восходящих витков и 4166 областей для нисходящих витков (рисунок 5.1.3.1).

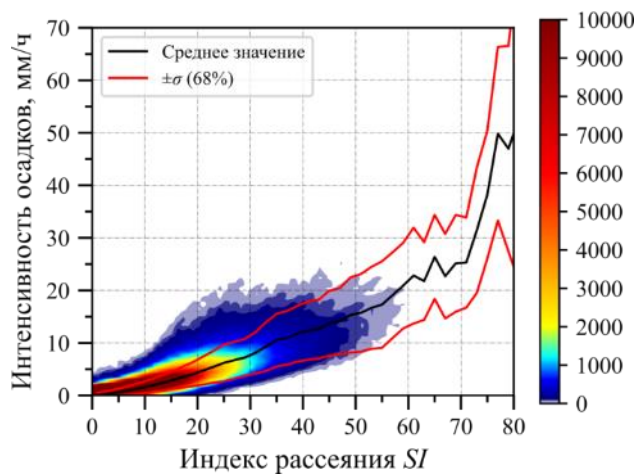


Рисунок 5.1.3.1 — Карта зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния накопленная по восходящим и нисходящим виткам. Статистика по всем областям, накопленным за 2020 г. в диапазоне временного совмещения  $\pm 1$  мин. Шкала указывает количество измерений, попавших в диапазон  $\Delta_{SI} = 0,5$  К и  $\Delta_I = 0,5$  мм/ч

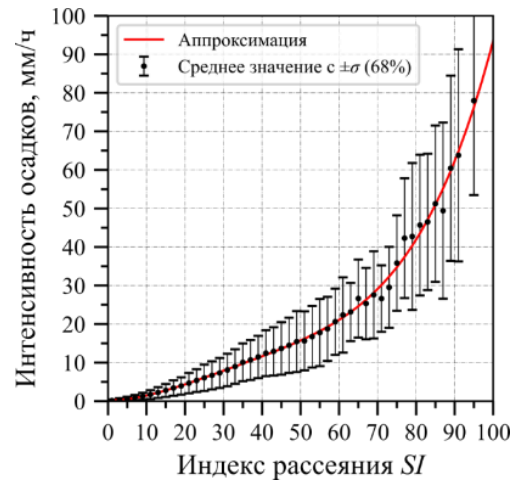


Рисунок 5.1.3.2 — Зависимость интенсивности осадков от индекса рассеяния  $SI$  и её аппроксимация функцией

Функциональную связь между индексом рассеяния  $SI$  и интенсивностью осадков  $I$  наиболее часто описывают степенным уравнением или полиномом. После исследования степенных, показательных и экспоненциальной функций в качестве аппроксимационных, было принято решение использовать полином 4-й степени, который обладает наилучшим коэффициентом корреляции. Аппроксимация построена в предположении, что погрешности реанализа и ошибки моделирования  $SI$  отсутствуют. На рисунке 5.1.3.2 приведены средние значения интенсивности осадков от  $SI$ , диапазон накопления  $\Delta_{SI} = 2$ , и СКО, которое обуславливает 68 % всех точек. При анализе областей с осадками было



обнаружено, что появляются области, в которых индекс рассеяния отрицательный, что в условиях поставленной задачи физически невозможно. Более того, анализ разных периодов показал систематическое смещение указанных областей с отрицательным индексом рассеяния в направлении полёта прибора. Таким образом, для восходящих витков смещение наблюдается вверх, для нисходящих — вниз. Наблюдаемые эффекты могут свидетельствовать только о присутствии дополнительного угла тангажа в ориентации луча визирования частотного канала 91,65 ГГц. Статистические оценки показывают, что разброс СКО достигает 50 %, а коэффициент корреляции составляет 0,75. Несомненно, есть чёткая связь между интенсивностью восходящего радиоизлучения системы «океан – атмосфера» и интенсивностью осадков. Однако, в связи с большим разбросом, восстанавливать осадки по данным МТВЗА-ГЯ пока затруднительно. Рекомендуется провести детальный анализ работы прибора МТВЗА-ГЯ, и в первую очередь проработать вопросы, связанные, как отмечено ранее, с геопривязкой по всем каналам и со сведением лучей диаграмм направленности для высокочастотного канала 91,65 ГГц.

## **5.2 Развитие моделей и методов анализа данных для мониторинга и прогноза состояния атмосферы, в т.ч. мощных вихревых структур с учетом ветровых потоков, фазовых переходов влаги, атмосферного электричества, вариаций космических лучей**

### ***5.2.1 Тепловая помеха при регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства***

Была исследована тепловая помеха регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства при заданных экспериментальных параметрах температурной стратификации водной среды. Исследован эффект искажения спектральных уровней пристеночных турбулентных пульсаций давления, регистрируемых приёмником звука в поле температурных неоднородностей. Были проведены систематические измерения турбулентных пульсаций давления в глубоком море в турбулентном пограничном слое при вертикальном всплытии всплывающего устройства с заданной глубины. Анализ экспериментальных данных показал, что при умеренных скоростях обтекания всплывающего устройства, превышающих 1–2 м/с, температурная восприимчивость пьезокерамического приёмника в решающей мере определяется его характерной «тепловой» частотой. Экспериментальные исследования, проведённые в работе, позволили определить параметры пороговой критической частоты, ниже которой температурный сигнал (тепловая помеха) преобладает над «полезным» сигналом, порождаемым турбулентными пульсациями давления. Было показано, что применительно к акустическим приёмникам, используемым в экспериментах на всплывающем устройстве, значения пороговой критической частоты составляют 130 и 215 Гц.

### ***5.2.2 Спиральный циклогенез как экстремальное пороговое явление во вращающейся стратифицированной влажной атмосфере***

Рассматривается концепция спирального циклогенеза, позволяющая на единой основе интерпретировать существование интенсивных крупномасштабных долгоживущих вихрей в атмосфере за счёт передачи энергии от движений облачного масштаба. В 2022 г. это явление было впервые обнаружено в высоких широтах Юпитера. Оно относится к классу крупномасштабных пороговых неустойчивостей в турбулентности с нарушенной зеркальной симметрией. Такая турбулентность, называемая спиральной, возникает во вращающейся стратифицированной влажной атмосфере. Работа посвящена проблеме тропического циклогенеза в атмосфере Земли. В случае тропических циклонов (ТЦ) впервые разработана точная диагностика возникновения крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости. Появление неустойчивости интерпретировано как зарождение

ТЦ. Данная диагностика и её чёткий количественный критерий тропического циклогенеза обсуждаются в контексте их успешного применения к двум различным идеализированным сценариям зарождения ТЦ и трём реально наблюдавшимся ТЦ в Индийском океане. Подчёркивается ключевая роль вращающихся кучево-дождевых облаков, известных как вихревые горячие башни — Vortical Hot Towers (VHTs). Они являются необходимым элементом как для обеспечения, так и для диагностики неустойчивости. Эти главные «действующие лица» спирального циклогенеза проиллюстрированы авторскими фотографиями, спутниковыми снимками и анимацией на основе данных идеализированного атмосферного моделирования. В работе предлагаются новые фундаментальные и прикладные интерпретации. Выдвинута гипотеза о двухмасштабном вихревом динамо-эффекте, предполагающая передачу энергии от масштаба VHTs (10–30 км по горизонтальным направлениям) непосредственно к мезомасштабам (сотни километров) общесистемной циркуляции тропического циклона. С использованием данных численного моделирования обсуждается проблема: «Что является триггером тропического циклогенеза?» Практическое использование предложенного подхода рекомендовано метеослужбам для оперативной диагностики и прогноза ТЦ. По результатам применения обсуждаемой диагностики предлагается считать возникновение крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости началом этапа зарождения ТЦ, а формирование тропической депрессии — завершением этого этапа. Данная диагностика может служить фундаментальным обоснованием для определения тропического циклогенеза, дающим точные количественные критерии, в том числе, и для новой стадии в международной шкале ТЦ — «Потенциальный тропический циклон», впервые введённой Национальной метеорологической службой США в 2017 г. (без таковых критериев) с целью повышения эффективности оперативного прогнозирования и предотвращения катастрофических ситуаций. Рассмотрены примеры ураганоподобных циклонов в Чёрном море и перспективы для их диагностики на основе развитого подхода. В мае–октябре 2021 г. вблизи побережья нашей страны образовалось три квазитропических циклона — КТЦ, ни один из которых не диагностировался в качестве такового в России. Формирование КТЦ сопровождается образованием интенсивно вращающихся мощных кучево-дождевых облачных башен, высотой 10–12 км и горизонтальными размерами порядка 10 км, как и суперячейки способных вызвать значительные разрушения и представляющих опасность для населения.

### ***5.2.3 Влияние глобального потепления на изменение климата в юго-западной зоне Чёрного моря и малопараметрическая нелинейная модель тропического циклогенеза***

Изменение климата в условиях глобального потепления приводит к наблюдению неожиданных интенсивных явлений, нехарактерных для конкретных географических районов. Квазитропический средиземноморский циклон под названием «Даниэль» в период с 4 по 7 сентября 2023 г. вызвал масштабные разрушения в ряде стран, через которые прошла его траектория. В работе были проанализированы зарегистрированные результаты наблюдений квазитропического шторма, формировавшегося в северо-восточной периферии циклонного вихря в юго-западных районах Чёрного моря. Особое внимание уделено району болгарского побережья южнее города Бургаса в период 4–6 сентября 2023 г. Проведённый анализ состоит из трёх частей — численное моделирование на основе малопараметрической нелинейной модели тропического циклогенеза, результаты прогнозирования других моделей и зарегистрированные радиолокационные и спутниковые изображения на период развития шторма. В анализе используются и результаты прогноза двух численных моделей для соответствующего временного диапазона и географического региона. Данные из Болгарской национальной гидрометеорологической сети на фактически зарегистрированное количество осадков, выпавших в регионе за период 1–7 сентября 2023 г., использованы в работе для

проведения корреляции с другими способами исследования. Представлены спутниковые изображения в видимой части спектра для соответствующего временного диапазона. Показана топология и динамика осадков на основе спутниковых радиолокационных изображений в сравнении с модельными прогнозами осадков. Сделаны выводы о возможностях прогноза неожиданных интенсивных явлений, нехарактерных для конкретных географических регионов. На основе проведённого анализа выдвинута гипотеза о том, что подобные квазитропические штормы с максимальными значениями наблюдаемых осадков в юго-западных районах Чёрного моря являются результатом глобального потепления, приводящего к изменению климата в регионе.

#### ***5.2.4 Модель генерации ограниченного в пространстве вихря в стратифицированной неустойчивой атмосфере***

Была разработана новая модель генерации осесимметричных сосредоточенных вихрей. Получено и проанализировано решение нелинейного уравнения для внутренних гравитационных волн в неустойчивой стратифицированной атмосфере в рамках идеальной гидродинамики. Соответствующие выражения, описывающие зависимости от радиуса для радиальной и вертикальной компонент скоростей во внутренней и внешней области вихря, включают комбинации функций Бесселя и модифицированных функций Бесселя. Предложенная новая нелинейная аналитическая модель позволяет исследовать структуру и нелинейную динамику вихрей в радиальной и вертикальной области. Вихрь ограничен по высоте. Максимум вертикальной компоненты скорости достигается на определённой высоте. Ниже этой высоты радиальные потоки сходятся к оси, а выше происходит отток. Возникшая неустойчивость в стратифицированной атмосфере приводит к росту радиальной и вертикальной составляющей скоростей по закону гиперболического синуса, переходящему в экспоненциальный рост. Характерное время роста определяется обратным темпом роста неустойчивости. Проанализировано формирование вихрей с конечными составляющими скоростей, нарастающих во времени. Радиальная структура азимутальной скорости определяется структурой начального возмущения и может изменяться с высотой. Максимальное вращение достигается на определённой высоте. Рост азимутальной скорости происходит по сверхэкспоненциальному закону.

#### ***5.2.5 Развитие процедур автоматического детектирования, локализации центров и восстановления интенсивности тропических циклонов по спутниковым изображениям***

Тропические циклоны (ТЦ) относятся к одним из наиболее опасных атмосферных явлений. В связи с этим актуальной задачей ДЗЗ является разработка автоматических средств и методов детектирования ТЦ на всех стадиях развития, определения координат его центра и других параметров (прежде всего, интенсивности) по данным многоспектральных спутниковых наблюдений. Эта задача наталкивается на определённые трудности по причине сильной изменчивости образов ТЦ на космических снимках. Согласно данным из отечественных и зарубежных публикаций, в настоящее время среднестатистическая ошибка предлагаемых в литературе методов определения центра ТЦ составляет около 0,24 географического градуса (по широте и долготе), что сопоставимо с типичным размером глаза ТЦ и свидетельствует о необходимости совершенствования современных технологий. Активно ведутся и исследования, нацеленные на автоматическое детектирование ТЦ на спутниковых многоспектральных изображениях с помощью методов машинного обучения. Средний показатель точности наиболее успешных подходов составляет около 95 % (пропуск ТЦ в 5 % случаев) на ИК-изображениях с геостационарных спутников. Для развития методов машинного обучения применительно к указанным выше задачам создана собственная специализированная база данных ТЦ, содержащая как образы ТЦ в различных спектральных диапазонах или полях восстановленных по дистанционным данным параметрах атмосферы, так и

характеристики соответствующих ТЦ на основе экспертных оценок и данных авиаразведки. Пример характерного набора дистанционных образов ТЦ приведён на рисунке 5.2.5.1. Наборы формировались по данным с геостационарных спутников GOES и Himawari (изображения в ИК диапазоне), а также данным микроволновых измерений приборов серии SSM/I, SSMIS, AMSR-E, AMSR-2, WindSat с солнечно-синхронных метеорологических спутников.

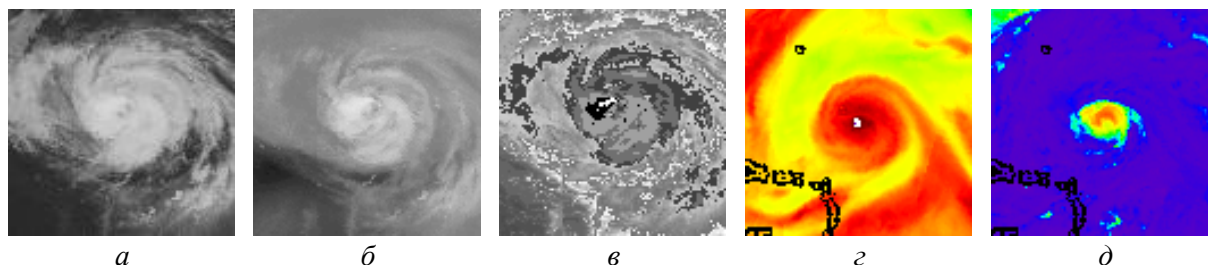


Рисунок 5.2.5.1 — Пример набора образов ТЦ по данным спутниковых наблюдений: *a* — тепловой ИК-канал 10,3–11,2 мкм; *b* — контрастированное ИК-изображение, 11 мкм; *c* — ИК-изображение в линии поглощения водяного пара 6,2–6,9 мкм (ВП); *d* — поле интегрального влагосодержания по микроволновым данным; *e* — поле водозапаса облаков по микроволновым данным

Таблица 5.2.5.1 — Архитектура CNN для восстановления интенсивности ТЦ

Слой	Выходной размер	Число параметров	Функция активации
Свёрточный слой (Convolutional layer) № 1	(100, 100, 8)	208	LeakyReLU
Слой максимального пуллинга (Max Pooling layer) № 1	(50, 50, 8)		-
Свёрточный слой № 2	(50, 50, 16)	1168	LeakyReLU
Свёрточный слой № 3	(50, 50, 16)	2320	LeakyReLU
Слой максимального пуллинга № 2	(25, 25, 16)		-
Слой исключения (Dropout) № 1			
Свёрточный слой № 4	(25, 25, 32)	4640	LeakyReLU
Свёрточный слой № 5	(25, 25, 32)	9248	LeakyReLU
Слой максимального пуллинга № 3	(12, 12, 32)		-
Свёрточный слой № 6	(12, 12, 64)	18496	LeakyReLU
Свёрточный слой № 7	(12, 12, 64)	36928	LeakyReLU
Слой максимального пуллинга № 4	(6, 6, 64)		-
Слой исключения № 2			
Свёрточный слой № 8	(6, 6, 128)	73856	LeakyReLU
Слой максимального пуллинга № 5	(3, 3, 128)		-
Свёрточный слой № 9	(3, 3, 256)	295168	LeakyReLU
Слой максимального пуллинга № 6	(1, 1, 256)		-
Выравнивание (Flatten)			-
Полносвязный слой (Fully-connected layer) № 1	(32)	8224	LeakyReLU
Слой исключения № 3			
Полносвязный слой № 2	(1)	33	-
Всего параметров: 450289			

Параметры ТЦ были собраны из трёх открытых баз данных (БД): БД Национального ураганного центра США (NHC) по ТЦ над Атлантическим океаном и северо-восточной частью Тихого океана «HURDAT2»; БД Китайского



метеорологического управления (СМА), включающая информацию по ТЦ западной части Тихого океана; БД Японского метеорологического агентства (ЖМА) по западной части Тихого океана. В итоге, сформированная БД имеет 43688 записей с примерами ТЦ интенсивностью от 10 до 160 узлов, наблюдавшихся с 1981 по 2022 г. В настоящее время ведётся доработка и отладка предложенных методов машинного обучения на базе свёрточных нейросетей (CNN) и других алгоритмов технического зрения для решения задач детектирования ТЦ, локализации центра и восстановления интенсивности ТЦ. Так, для автоматического восстановления интенсивности ТЦ по их ИК-изображениям предложена архитектура свёрточной нейронной сети, приведённая в таблице 5.2.5.1.

Согласно предварительным оценкам, точность автоматического детектирования ТЦ по предложенной методике к настоящему времени составляет 98%, что лучше известных из литературы показателей. Также на уровень лучших мировых показателей выходит оценка среднеквадратичной погрешности восстановления интенсивности ТЦ (около 11,5 узлов). При том, что в работе используется наиболее представительная (по диапазону интенсивностей, интервалу наблюдений и географическому охвату) из известных по публикациям выборка примеров ТЦ, как правило, на один или несколько порядков превосходящая выборки предшествующих работ по объёму информации (числу отдельных записей). Окончательные оценки планируется получить на следующем этапе работ (в 2024 г.) после уточнения конфигурации и параметров построенных свёрточных нейросетей и вспомогательных алгоритмов технического зрения в результате обработки полного объёма информации сформированной БД.

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

#### ***5.3.1 Разработка методов определения концентрации частиц в модельном рассеивающем слое для лидара упругого рассеяния.***

Проведён сравнительный анализ двухпозиционных лидаров (ДПС) упругого рассеяния, использующих обычную коаксиальную схему, с аналогичным лидаром ДПС упругого рассеяния, использующим оптимальную коаксиальную схему. Под оптимальной коаксиальной схемой подразумевается случай, когда угловые размеры пучка и поля зрения приёмных каналов практически одинаковы. В этом случае изменение геометрического фактора (ГФФ) для оптимальной ДПС определяет угловое увеличение поля зрения и углового размера пучка. Для обычных схем изменение ГФФ даёт только качественные выводы об угловой трансформации пучка в рассеивающей среде. Оптимальная ДПС имеет максимальное значение отношения сигнал/фон, так как угловые размеры пучка и поля зрения одинаковы. Для обычных ДПС отношение сигнал/фон включает в себя отношение угловых размеров пучка и поля зрения приёмного канала. Показано, что аппаратную функцию в случае оптимальной ДПС можно определить посредством применения стандартных перфорированных экранов на трассах с фиксированной дальностью. Перфорированный экран может быть получен по снимкам рассеивающих частиц. Для таких экранов прозрачные отверстия соответствуют поперечному сечению частиц. Полидисперсным частицам соответствуют круглые отверстия с радиусами, распределёнными по логнормальному распределению. Этим частицам можно поставить в соответствие экран с монодисперсными отверстиями. Оба этих экрана имеют одинаковые индикаторы размера частиц в виде углового размера ореола вокруг пучка, проходящего через перфорированный экран. Тогда поперечным сечениям отверстий экрана с монодисперсными отверстиями можно сопоставить эквивалентное сечение. Эквивалентное сечение определяется отношением моментов второго и первого порядков для сечений частиц исследуемого экрана. Такой подход применим для несферических частиц. Сечениям несферических частиц соответствуют отверстия разной формы и размеров. Следует отметить предельные случаи, когда сечения

образованы неоднородностями в виде переплетающихся полос и нитей. Таким экранам можно сопоставить поперечные сечения по угловому размеру ореола при рассеянии вперёд и по трёхмерным экранам, изготовленным по изображениям частиц. Аппаратная функция для обычных ДПС определяется посредством моделирования, так как не может быть измерена с помощью перфорированных экранов. При этом для измерения коэффициента обратного рассеяния (КОР) необходимы измерения обратного рассеяния от стандартных рассеивающих поверхностей с известными угловыми диаграммами рассеяния. Существенным ограничением использования такой методики являются трудности учёта отклонений от стандартных угловых диаграмм рассеяния (например, ламбертовой). Для оптимальных ДПС обосновано применение трёхмерных отражающих объектов, для которых дифференциальное сечение обратного рассеяния известно, так как диаграмма направленности описывается уравнениями Максвелла. Использование таких объектов позволяет детектировать обратный сигнал, сравнимый по величине с сигналом обратного рассеяния из атмосферы. Такой подход позволяет придать наглядный физический смысл соотношению между базовыми коэффициентами КОР и коэффициентом экстинкции (КЭ). В этом случае отношение базовых коэффициентов выражается через отношение радиуса сечения эквивалентной частицы к радиусу кривизны для передней поверхности частицы. Это позволяет определять необходимую для решения лидарного уравнения связь между коэффициентами обратного рассеяния и экстинкции. Для проводящей сферы это отношение не зависит от геометрических характеристик рассеивающей частицы. Аналогичный подход используется для интерпретации радиолокационного сечения. Таким образом, оптимальная коаксиальная схема позволяет измерить базовые коэффициенты для некоторого рассеивающего слоя. Измеряемый по сигналу обратного рассеяния коэффициент обратного рассеяния можно разложить на молекулярную и аэрозольную составляющие. Молекулярная составляющая определяется по табличным значениям спектральной зависимости коэффициента обратного рассеяния на основе термодинамической и оптической модели атмосферы. Для прямых измерений аэрозольной составляющей из измеряемого лидаром значения коэффициента обратного рассеяния вычитается молекулярная составляющая. Коэффициент экстинкции измеряют на трассах с фиксированной дальностью. Микрофизическая интерпретация измеряемых лидаром упругого рассеяния базовых величин основана на применении модели эквивалентного слоя, состоящего из монодисперсных частиц. Рассмотрены способы определения геометрии эквивалентной частицы по рассеянию в прямом и обратном направлениях. Для этого предложено применять характерные для нефелометров контактные методы измерений. Для монодисперсных сферических частиц число эквивалентных частиц, измеренных нефелометром по сигналам прямого и обратного рассеяния, совпадают. При этом измеренное количество эквивалентных частиц равно числу зарегистрированных частиц. Для сферических частиц, размеры которых распределены по логнормальному закону, количество измеренных по сигналам прямого и обратного рассеяния эквивалентных частиц будет однозначно связано с количеством частиц, зарегистрированных нефелометром. В задаче определения концентрации эквивалентных частиц обосновано применение ненормализованных моментов первого и второго порядков для зарегистрированных сигналов от частиц рассеивающего слоя. Показано, что при наличии таких измерений концентрация эквивалентных частиц определяется по базовым лидарным коэффициентам. Указанная концентрация однозначно сопоставляется концентрации частиц внутри рассеивающего слоя. При этом рассеивающий слой может состоять из полидисперсных и несферических частиц.

#### **5.4 Исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов**

В рамках проекта по созданию в Институте технологии аэронавтики (ИТА, Sao Jose dos Campos, SP, Brasil) монитора нейтронов в приземной атмосфере рассматривается

возможность использования цилиндрических пропорциональных счётчиков для измерения спектра нейтронов в диапазоне от тепловых и до промежуточных энергий. Подобные счётчики, применяемые в нейтронных мониторах космических лучей, обладают большими чувствительными объёмами и поверхностями, что позволяет обеспечить статистику, необходимую для мониторинга вариаций спектра нейтронов, как атмосферного, так земного происхождения в близком реальном времени режиме. Кроме задач, связанных с обеспечением радиационной безопасности, установка будет использована для изучения таких атмосферных явлений, как природа и вариации атмосферной радиации, определяемых метеорологическими и геологическими факторами. Указанные направления исследований особенно актуальны для Бразилии, являющейся страной с самым высоким естественным радиационным фоном на планете. 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). Проблема прежде всего связана тем, что регистрируемый поток зависит, как от типа детектора, так и от его окружения. Вследствие этого корректная интерпретация данных экспериментальной установки требует детального моделирования транспорта нейтронов в окружающей детектор среде. В настоящее время для решения подобных задач широко используется разработанный в ЦЕРНе программный пакет Geant4. В этом году:

- выполнено моделирование потоков альбедных нейтронов рождающихся при взаимодействии протонов и нейтронов атмосферных ливней с различными покрытиями земной поверхности: вода, почвы различного состава, растительность;
- определена эффективность цилиндрического счётчика для различных энергий и угловых распределений регистрируемых нейтронов;
- построена упрощённая модель атмосферного ливня (с подавлением ветвей реакций, не ведущих к образованию нейтронов);
- продолжена работа по разработке программного кода для восстановления спектра нейтронов по скоростям счёта (unfolding) цилиндрических счётчиков с различной толщиной замедлителя.

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

### ***5.5.1 Нейросетевой подход к восстановлению общего содержания влаги в атмосфере над разными типами подстилающей поверхности (океан, суша)***

Радиотепловые измерения имеют высокую чувствительность к содержанию влаги в атмосфере Земли, и, в частности, к водяному пару, а водяной пар, в свою очередь, является как результатом испарения влаги с поверхности, так и источником всех видов осадков. При решении сложной обратной задачи вертикального распределения влаги в тропосфере важными регуляризирующими параметрами являются интегральные характеристики вертикального атмосферного столба, прежде всего — интегральное влагосодержание атмосферы (PWV). Если задача восстановления интегрального влагосодержания над океаном по спутниковым радиотепловым наблюдениям может считаться, в целом, уже решённой с приемлемой точностью, то алгоритмы восстановления PWV над сушей требуют дальнейшего совершенствования. Это обусловлено сложной пространственно-временной изменчивостью поглотительных и отражательных характеристик суши в микроволновом диапазоне, существенно меняющихся даже в пределах типичного пятна разрешения современных спутниковых радиометров. В рамках работы над темой, на текущем этапе была разработана нейросетевая методика восстановления интегрального влагосодержания (PWV) над любым типом поверхности

или по всему земному шару. Основой для восстановления PWV служат радиотепловые измерения приборов SSMIS на трёх спутниках серии DMSP: F16, F17 и F18. Приборы на этих спутниках выполняют наблюдения в близкое местное время. SSMIS имеет 24 радиометрических канала на частотах от 19 до 200 ГГц и конический тип сканирования под углом  $53^\circ$ . Для восстановления PWV из радиотепловых измерений SSMIS был использован подход с применением искусственных нейронных сетей (ИНС). По итогам проведённых численных экспериментов авторами была предложена и реализована схема ИНС прямого распространения с 10 нейронами в скрытом слое с передаточной функцией  $\tanh$ . В качестве входов ИНС (предикторов) использовались данные TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 каналов 1–18 и высота рельефа с флагом типа поверхности — всего 20 входов. Выход у ИНС единственный — значение PWV. Таким образом, была реализована регрессионная модель ИНС. Для обучения ИНС была построена обучающая выборка, где в качестве независимой информации об интегральном влагосодержании атмосферы были использованы оценки реанализа ECMWF Era 5 за 2020 г. Реанализ Era5 был предложен для использования в настоящей работе, как наиболее современный реанализ ECMWF, а также в связи с его временным разрешением — 1 ч и пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$ , которое соответствует спутниковому разрешению. Выполнялось точное пространственное совмещение спутниковых данных с данными реанализа путём пространственной интерполяции и совмещение по времени в пределах  $\pm 15$  мин путём выбора ближайших по времени дистанционных измерений и оценок реанализа. В итоге, размер обучающей выборки составил 5 млн точек. Для тестирования сети использовались 3 млн точек измерений SSMIS, совмещённых с данными Era5. Данные, входящие в выборки, были отобраны в течение 2020 г. случайным образом, с равномерным географическим распределением и по времени. По результатам тестирования точность (среднеквадратичная невязка с данными реанализа) восстановления PWV предложенным нейросетевым алгоритмом над всеми типами поверхности составила 2,4 мм (рисунок 5.5.1а), а над сушей — около 3 мм (рисунок 5.5.1б).

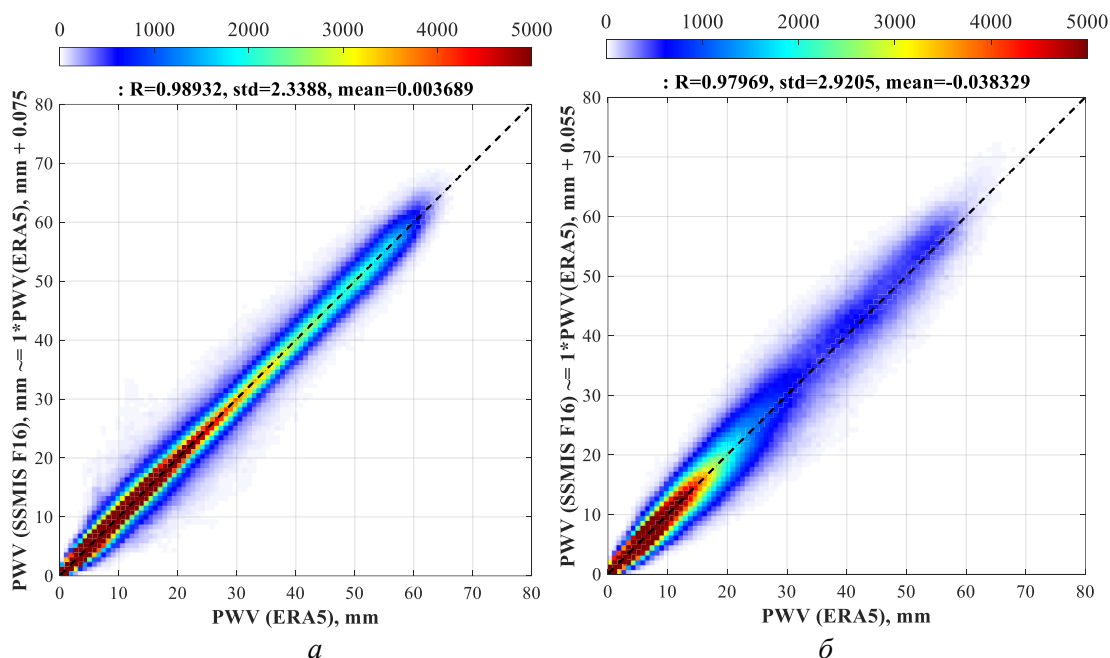


Рисунок 5.5.1 — Скаттерограмма значений интегрального влагосодержания атмосферы, восстановленных по данным SSMIS F16 (вертикальная шкала), и по данным реанализа Era5 (горизонтальная шкала): а) над всем Земным шаром, б) над сушей; цветом обозначено число пар соответствующих значений (цветовая шкала — сверху)

Как видно, в обоих случаях построенные регрессии характеризует высокий коэффициент детерминации ( $R^2 \cong 0,98$ ). На рисунке 5.5.2, в качестве примера, приведены географические области, где, согласно обработанным радиотепловым спутниковым



данным за июль 2020 года значения интегрального влагосодержания превысили порог в  $50 \text{ кг/м}^2$ . Видно, что географическое распределение PWV подчиняется ожидаемым закономерностям: в основном высокие значения PWV сосредоточены во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК). Формирование ветвей, уходящих от ВЗК в средние широты и сильно отклоняющиеся на восток, объясняются действием тропических циклонов и атмосферных рек. Обращает на себя внимание наличие крупных областей суши, где интегральное влагосодержание также может принимать экстремально высокие значения в течение года. Помимо собственно ВЗК (над Африкой и Южной Америкой), такие области возникают под действием процессов, вызванных сезонной миграцией ВЗК, например, муссонов над Индией и Китаем.

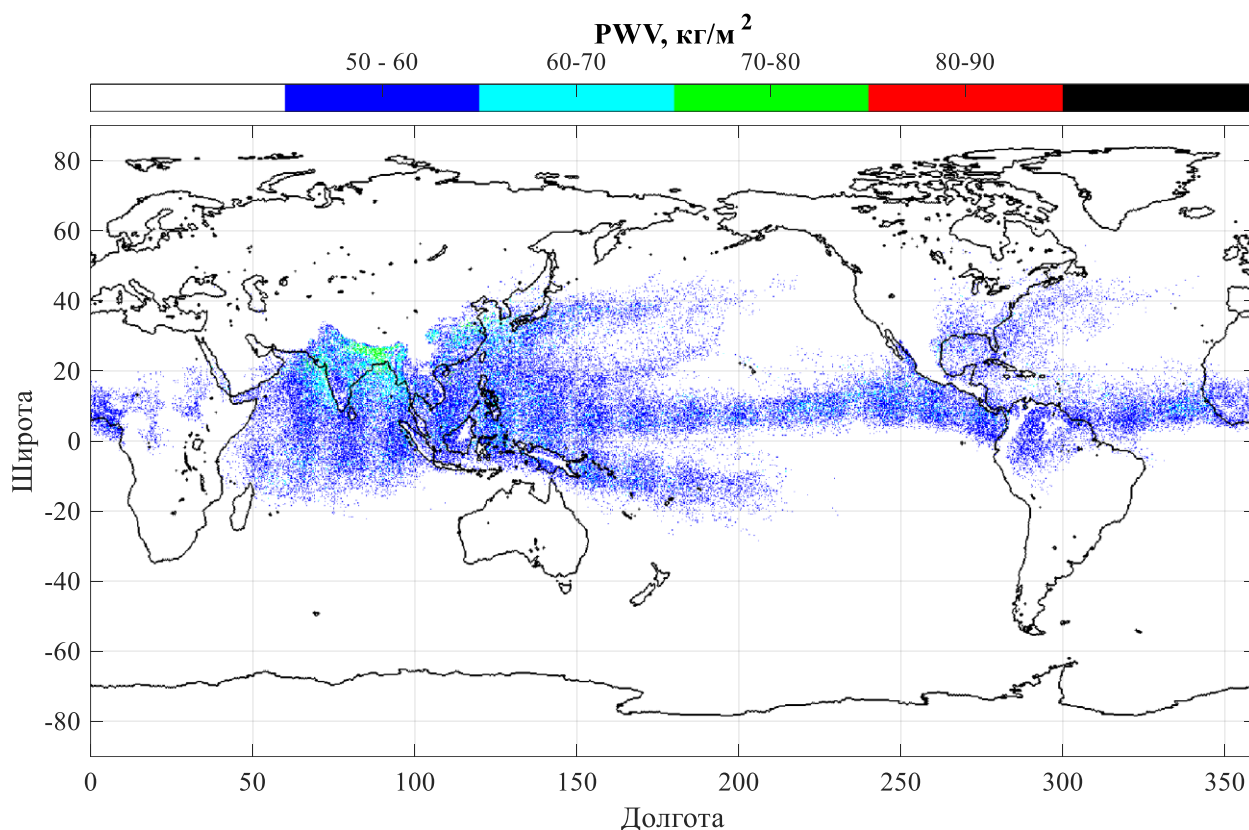


Рисунок 5.5.2 — Распределение высоких значений интегрального влагосодержания атмосферы (цветовая шкала диапазонов — сверху) за июль 2020 года, восстановленных по данным SSMIS F16 с помощью разработанного нейросетевого подхода

## Заключение

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

- разработка научных основ и методов анализа временных серий спутниковых многосенсорных наблюдений исследований и мониторинга атмосферных явлений;
- развитие моделей и методов анализа данных для мониторинга и прогноза состояния атмосферы, в том числе мощных вихревых структур с учётом ветровых потоков, фазовых переходов влаги, атмосферного электричества, вариаций космических лучей;
- разработка новых методов обработки данных дистанционных наблюдений в ИК и видимом диапазоне и лидарных наблюдений облачности;

- исследование вариаций рентгеновской атмосферной эмиссии по данным спутниковых экспериментов;
- развитие методик решения задач восстановления профилей влажности и температуры тропосферы по данным ДЗЗ с использованием нейронных сетей.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Атмосфера» в 2023 г. выполнены в полном объеме.

## РАЗДЕЛ 6 МОНИТОРИНГ-ЭФФЕКТ

### Введение

В 2023 г. в рамках настоящего раздела были проведены работы по следующим направлениям:

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

В настоящем разделе отчёта представлены основные результаты выполненных в 2023 г. работ. Подробно полученные результаты описаны в работах [14, 33, 41, 48, 52, 59, 64–67, 70, 76, 88, 106, 107, 113, 125–127].

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

В июне 2023 г. на солнечно-синхронную околоземную орбиту был выведен гидрометеорологический КА «Метеор-М» № 2–3, в состав научной аппаратуры которого входит комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2, продолжающий ежедневную съёмку Земли в видимом и ближнем ИК-диапазоне, начатую аппаратурой КМСС на КА «Метеор-М» № 1 и продолженную КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 (*Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Форш А.А.* Комплекс многозональной спутниковой съёмки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83; *Полянский И.В., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В.* Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92).

Уникальной особенностью аппаратуры КМСС-2 является сочетание достаточно высокого пространственного разрешения от 55 м и широчайшей полосы обзора более 1000 км при работе на круговой орбите высотой 830 км. Такие возможности продиктованы необходимостью ведения ежедневного оперативного космического мониторинга природных и техногенных процессов, происходящих на территории Российской Федерации, которая должна быть полностью отснята в течение трёх дней.

Целевая информация, получаемая на основе данных КМСС-2, предназначена для решения значительного количества научных, природоохранных и хозяйственных задач, а в сочетании с данными других приборов дистанционного зондирования представляет интерес также и для поддержки фундаментальных научных исследований.

Наземный сегмент приёма и обработки данных КМСС-2 включает три региональных центра научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» Росгидромета: Европейский, Сибирский и Дальневосточный, зоны видимости которых обеспечивают полное покрытие территории России, а также 68 территориальных центров. Ведущей организацией, осуществляющей оперативное управление, планирование космической съёмки, приём, обработку, каталогизацию и распространение целевой информации, являются Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦОМЗ) АО «Российские космические системы».

КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 аналогичен установленному на КА «Метеор-М» № 2-2. Он включает в себя две камеры МСУ-100ТМ с фокусным расстоянием 125 мм, которые на КА «Метеор-М» № 2-3 условно обозначаются МСУ-231 и МСУ-232. Их основные характеристики приведены в таблице 6.1.1.1. Плоскости наблюдения всех трёх спектральных каналов камер КМСС-2 оптически совмещены (с точностью до

нескольких десятков пикселей) в плоскости, перпендикулярной направлению полета. В этой плоскости их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол  $\pm 15,2^\circ$ , в результате обеспечивается формирование суммарной полосы обзора камер более 1000 км. Вследствие наклона оптических осей камер размер проекции пикселя в плоскости наблюдения изменяется от 55 м в надире до 80 м на краю полосы съемки. Шаг отсчета в направлении полета определяется частотой строк 125 Гц и равен 53 м.

### **6.1.1 Разработка методов и алгоритмов автоматической полетной геометрической калибровки Комплексов многозональной спутниковой съемки КМСС**

Полетная геометрическая калибровка КМСС-2 была проведена по изображениям береговой линии и островов в Эгейском и Чёрном морях с использованием банка контрольных точек (КТ), созданного по данным Sentinel. Методика геометрической калибровки была аналогична применявшейся на предыдущих комплексах КМСС и описанной в работах (Жуков Б.С., Жуков С.Б., Кондратьева Т.В., Никитин А.В. Автоматизация полетной геометрической калибровки Комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 201–212.; Жуков Б.С., Гришанцева Л.А., Жуков С.Б., Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Пермитина Л.И., Полянский И.В. Полетная геометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 93–100).

Полетная геометрическая калибровка проводится на основе синхронно получаемых навигационных данных, которые включают для каждой строки исходных изображений КМСС-2 время регистрации, радиус-вектор КА в гринвичской геоцентрической системе координат (ГСК) и матрицу перехода из обобщенной системы координат звездных датчиков (СКЗД) в ГСК.

Задачей геометрической калибровки является определение единичного вектора наблюдения  $e(s)$  для каждого элементарного детектора  $s$  каждой ПЗС-линейки. Фактически полетная калибровка проводится в СКЗД, в которой предоставляются данные об ориентации КА, используемые для геопривязки изображений. Однако для наглядности представления вектора  $e(s)$  определяются в условной приборной системе координат (ПСК), жестко связанной с СКЗД с использованием номинальных углов установки камер и звездных датчиков на КА. Реальные углы установки камер и звездных датчиков могут отличаться от номинальных и измениться в полёте, что учитывается в калибруемом распределении  $e(s)$  в ПСК.

Для калибровки используется созданный в ИКИ РАН банк контрольных точек (КТ) на основе изображений Sentinel (<https://scihub.copernicus.eu/>), имеющих разрешение 10 м и точность географической привязки 12 м ( $3\sigma$ ). Эталонные изображения КТ выбираются в спектральных зонах Sentinel 0,56, 0,665 и 0,842 мкм, близких к спектральным зонам КМСС-2, в проекции UTM и имеют размер  $192 \times 192$  пикселей размером 10 м (при закруглении до 60 м —  $32 \times 32$  пикселя).

Для калибровки используются геопривязанные изображения КМСС-2 также в проекции UTM с разрешением  $\Delta = 60$  м.

Методика калибровки включает следующие процедуры, проводимые независимо для каждой линейки фотоприемников:

- выбор КТ, которые попадают в область, покрываемую изображением, и определение их области поиска КТ, которая с запасом перекрывает ошибку географической привязки изображений КМСС-2;
- нахождение положения КТ на изображении корреляционным методом с пиксельной точностью, используя закругленные до 60 м эталонные изображения



КТ, и его уточнение до 10 м, используя изображения КТ с исходным разрешением;

- определение векторов направления наблюдения КТ в ГСК и их преобразование в ПСК с использованием данных о положении и ориентации КА;
- определение элементов внутреннего ориентирования канала: эффективного фокусного расстояния, положения плоскости наблюдения и коэффициентов дисторсии в плоскости наблюдения и в перпендикулярном направлении, и построение на их основе аппроксимирующей проекционной функции  $e(s)$ .

Для калибровки использовались 30 кадров МСУ-231 и 34 кадра МСУ-232, полученных в августе – ноябре 2023 г., с изображением береговой линии и островов в Эгейском и Черном морях. Примеры полученных изображений с детектированными КТ показаны на рисунках 6.1.1.1 и 6.1.1.2.



Рисунок 6.1.1.1 — Фрагмент изображения, полученного камерой МСУ-231 в районе Керченского пролива. Квадратами обозначены распознанные контрольные точки



Рисунок 6.1.1.2 — Фрагмент изображения, полученного камерой МСУ-232 над островами в Эгейском море. Квадратами обозначены распознанные контрольные точки

Общее число распознанных КТ в каналах камер составляло от 2844 до 8610, их среднеквадратическое отклонение от аппроксимирующей функции составляло 0,32–

0,41 пикселя в направлении полета и 0,52–0,57 пикселя в перпендикулярном направлении (таблица 6.1.1.1).

Таблица 6.1.1.1 — Число найденных КТ и обобщенные параметры калибровки

Параметр	Камера МСУ-231			Камера МСУ-232		
	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 1	Канал 2	Канал 3
Число КТ	3654	5158	2844	7939	8610	7548
Фокусное расстояние, мм	125,103	125,195	125,107	125,016	125,108	125,024
СКО по $\theta$ , пиксель	0,32	0,33	0,32	0,41	0,40	0,40
СКО по $\varphi$ , пиксель	0,54	0,53	0,52	0,57	0,55	0,55

Фокусное расстояние во всех каналах близко к расчетному 125 мм. КТ, полученные на разных изображениях, хорошо ложатся на общую аппроксимирующую функцию (рисунки 6.1.1.3 и 6.1.1.4). Здесь для большей наглядности измеренные вектора наблюдения в ПСК  $\mathbf{e}_i = (e_{i,x}, e_{i,y}, e_{i,z})$  представляются углами:

$$\theta_i = \arctg(e_{i,y}/e_{i,z}), \quad \varphi_i = \arctg(e_{i,x}/e_{i,z}),$$

где угол  $\theta$  характеризует наклон направления наблюдения в ПСК вдоль трассы полета, угол  $\varphi$  — поперёк трассы полета.

Угловое расхождение каналов на краю поля зрения достигает 7 угл. мин (около 30 пикселей) — для МСУ-232 в направлении полета, для МСУ-231 — в поперечном направлении (рисунок 6.1.1.5). При угловом дрейфе КА не более 0,005 град/с это приведет к угловому рассогласованию каналов геометрически скорректированных изображений не более чем на четверть пикселя.

В результате проведенных коррекций достигнута точность полетной калибровки камер КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 аналогичная ранее полученным значениям на КА «Метеор-М» № 2-2 (Жуков Б.С., Гришанцева Л.А., Жуков С.Б., Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Пермитина Л.И., Полянский И.В. Полетная геометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 93–100), что подтвердило корректность разработанных методик.

Проекционная функция каналов  $\mathbf{e}(s)$  в условной ПСК хранится в файлах геометрической калибровки, которые предоставляются пользователям и используются при геометрическом совмещении и геопривязке изображений по навигационным данным при предварительной обработке изображений (Жуков Б.С., Василейский А.С., Жуков С.Б., Зиман Я.Л., Полянский И.В., Бекренев О.В., Пермитина Л.И. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 260–266).

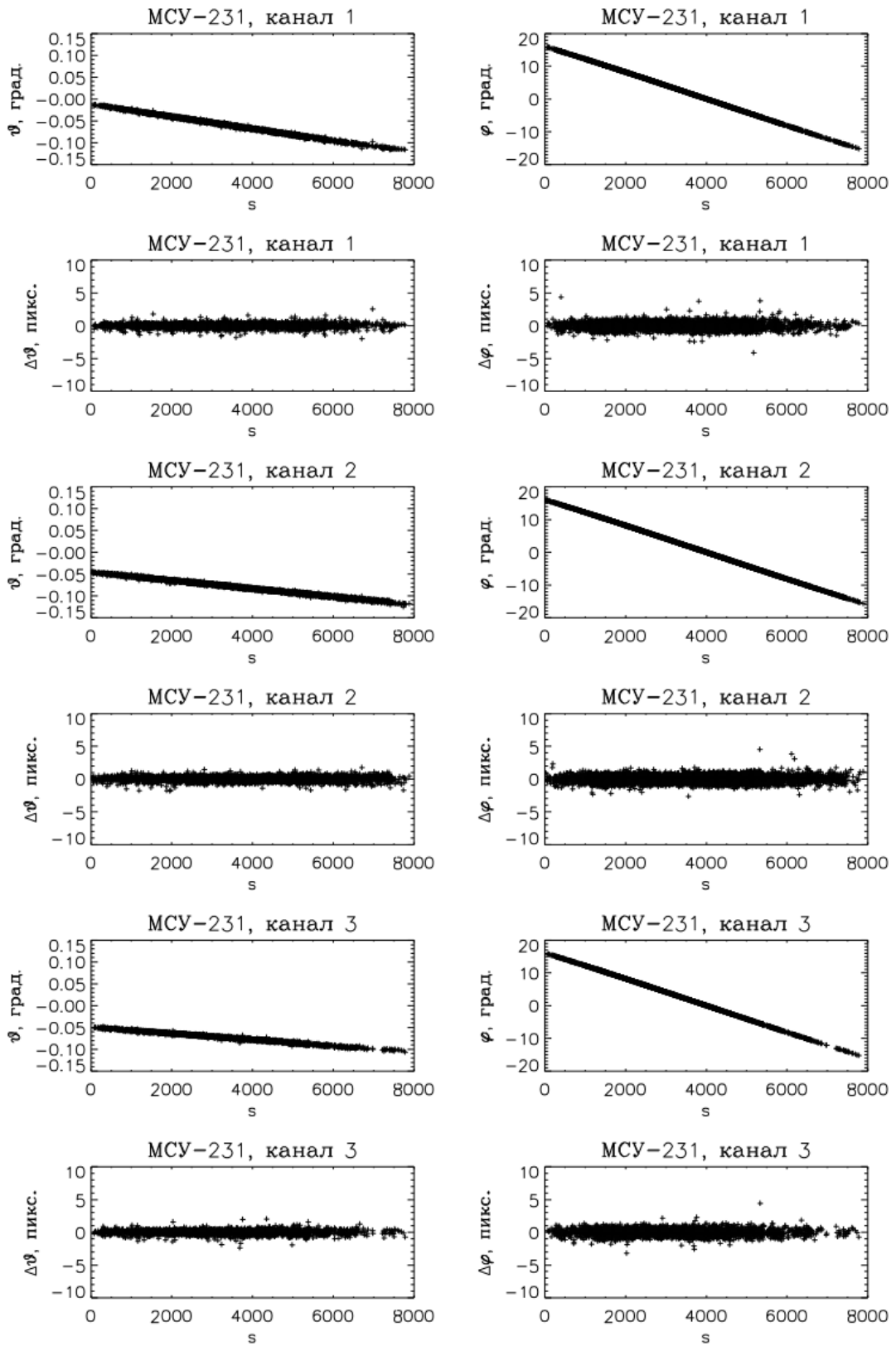


Рисунок 6.1.1.3 — Углы  $\theta$  и  $\phi$  наблюдения контрольных точек в ПСК и их остаточные отклонения  $\Delta\theta$  и  $\Delta\phi$  от калиброванной проекционной функции для камеры МСУ-231

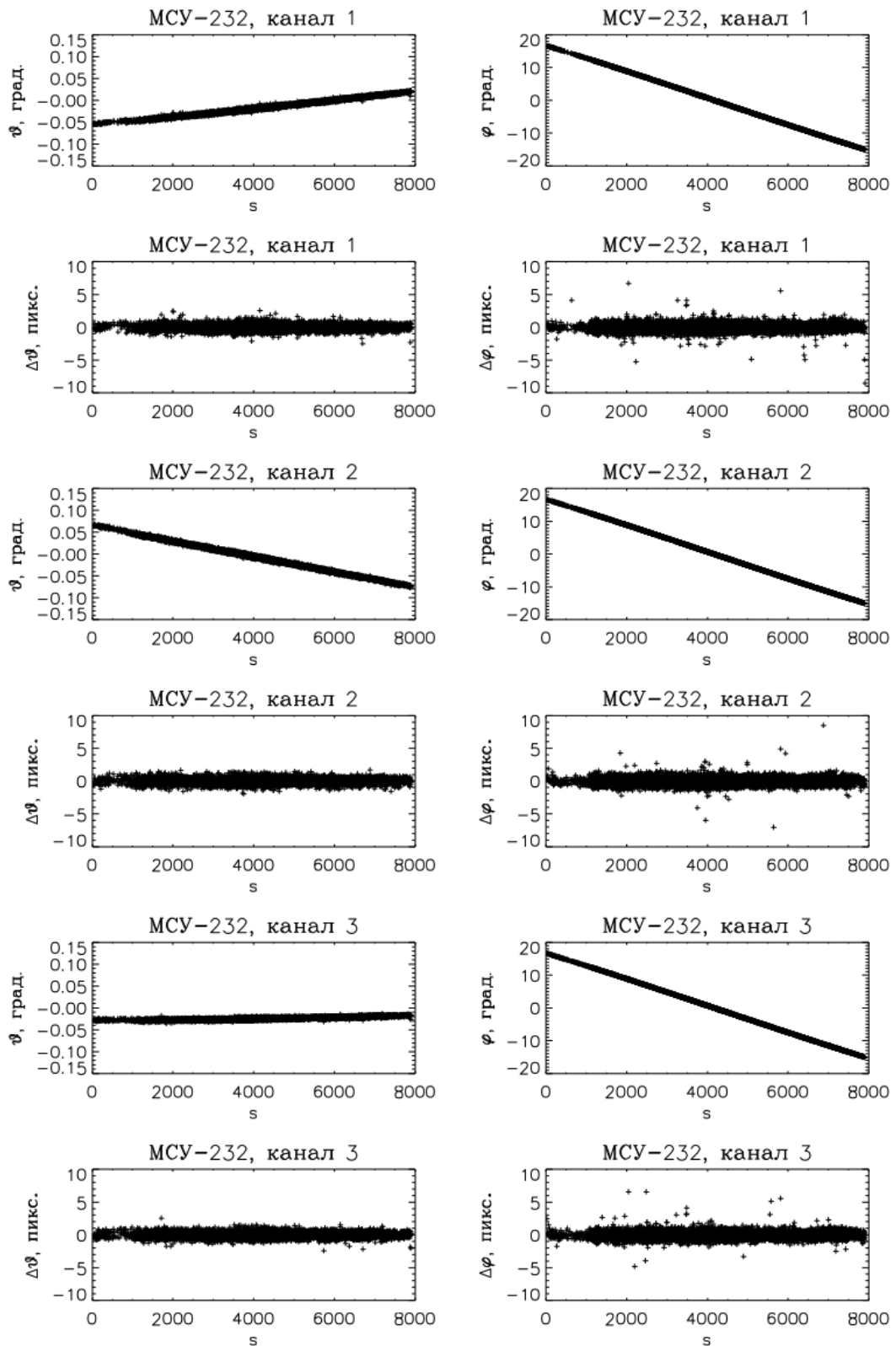


Рисунок 6.1.1.4 — Углы  $\theta$  и  $\phi$  наблюдения контрольных точек в ПСК и их остаточные отклонения  $\Delta\theta$  и  $\Delta\phi$  от калиброванной проекционной функции для камеры MSU-232

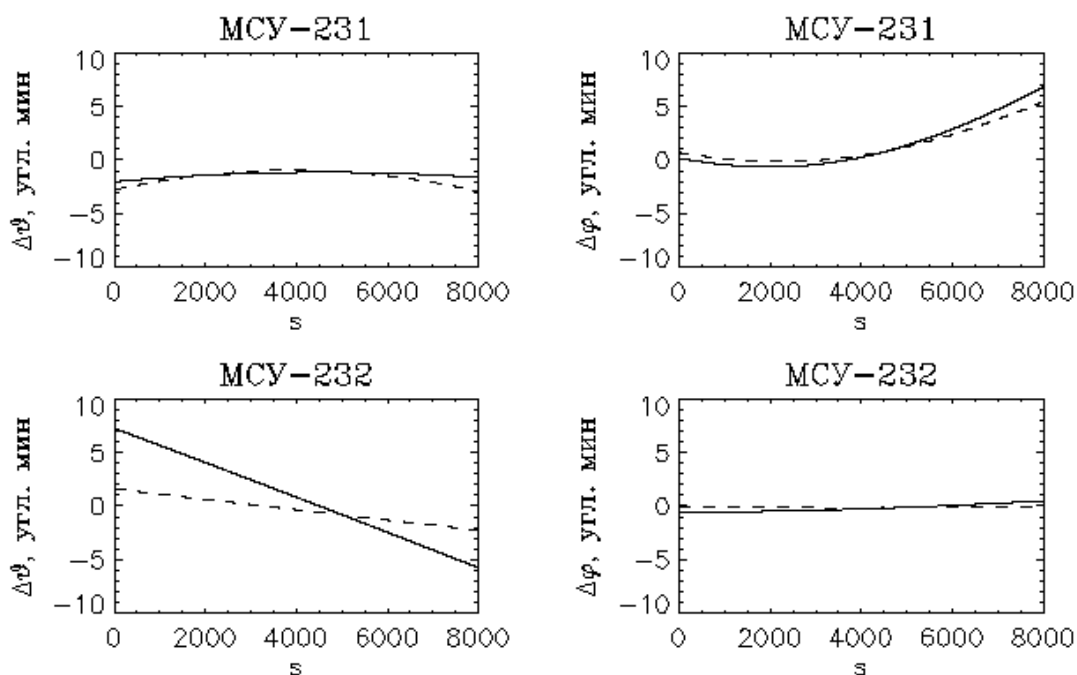


Рисунок 6.1.1.5 — Угловое расхождение каналов камер КМСС-2 относительно канала 1 вдоль трассы полёта (угол  $\Delta\theta$ ) и поперек трассы полёта (угол  $\Delta\phi$ )

### 6.1.2 Разработка методики и проведение полетной радиометрической калибровки приборов КМСС

Оценка радиометрических характеристик аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» №2-3 в ходе лётных испытаний проводилась путём сравнения яркостных характеристик изображения естественных наземных полигонов на территории Гренландии, регистрируемых аппаратурой КМСС-2, с коррелируемыми по времени данными спектрорадиометра MODIS/Aqua.

Сравнение яркостных характеристик полигонов Гренландии проводилось для камер КМСС-2 с данными MODIS методом сопоставления коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) природных объектов на верхней границе атмосферы, измеренных в спектральных зонах приборов. Данный метод используется для проведения ежегодной радиометрической калибровки приборов КМСС по снежным полям Антарктиды (Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Пермитина Л.И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки на КА «Метеор-М» №1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123–137; Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Полянский И.В. радиометрические характеристики комплексов многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 67–76.).

Для проведения сопоставления, КСЯ для спектральных зон MODIS, пересчитанные в значения КСЯ соответствующих спектральных каналов камер КМСС-2 с помощью регрессионных соотношений (таблица 6.1.2.1), сравнивались со значениями КСЯ, измеренными КМСС-2.



Таблица 6.1.2.1 — Регрессионные соотношения для пересчета значений КСЯ между спектральными зонами камер КМСС-2 и MODIS/Aqua (mod\_i — КСЯ в зоне i MODIS/Aqua) и коррекция

Камера, спектральный канал, нм	Регрессионные соотношения	Коррекция, %
МСУ-231, канал 1 (640–690)	$1,024 \cdot \text{mod}_1$ (СКО = 0,0044)	1
МСУ-231, канал 2 (785–900)	$0,662 \cdot \text{mod}_2 + 0,347 \cdot \text{mod}_{17}$ (СКО = 0,0057)	16
МСУ-231, канал 3 (520–590)	$0,974 \cdot \text{mod}_4$ (СКО = 0,0052)	0,05
МСУ-232, канал 1 (640–690)	$1,023 \cdot \text{mod}_1$ (СКО = 0,0044)	1
МСУ-232, канал 2 (785–900)	$0,662 \cdot \text{mod}_2 + 0,348 \cdot \text{mod}_{17}$ (СКО = 0,0057)	17
МСУ-232, канал 3 (520–590)	$0,974 \cdot \text{mod}_4$ (СКО = 0,0054)	0,04

Регрессионные соотношения были получены по методике, изложенной в работе (Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Пермитина Л.И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» №1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123–137; Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Пермитина Л.И., Полянский И.В. Сопоставление радиометрических данных КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 с данными MODIS КА Terra и OLI Landsat-8 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 19–28.), путём моделирования спектров отражения на верхней границе атмосферы большого числа природных объектов (почвы, растительность, вода, снег, облака) при различном состоянии атмосферы и различной высоте Солнца. Среднеквадратическая ошибка (СКО) пересчёта КСЯ между спектральными зонами камер КМСС-2 и MODIS, рассчитанная по всем рассмотренным объектам и условиям наблюдения, составляет от ~0,0044 до ~0,0057 с максимальным значением в ИК-канале КМСС-2, в котором ФСЧ КМСС-2 и MODIS существенно различаются.

Полученные результаты показали расхождения КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 и MODIS и потребовали проведения коррекции (значения представлены в таблице 6.1.2.2 в процентах). Максимальное значение коррекция имеет в ИК-каналах камер КМСС-2 и составляет 16-17%.

На рисунках 6.1.2.1, 6.1.2.2 представлены результаты сопоставления КСЯ, измеряемых на верхней границе атмосферы в спектральных каналах съемочных систем КМСС-2 и MODIS/Aqua после проведения коррекции.

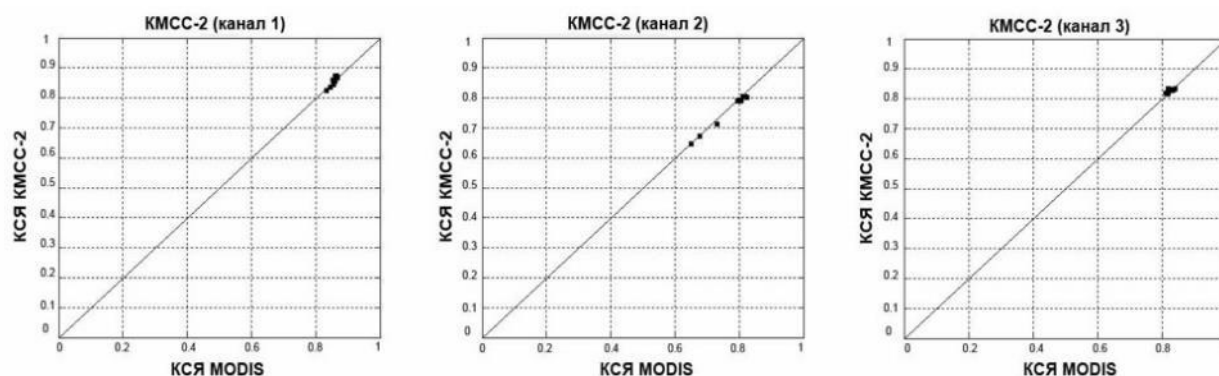


Рисунок 6.1.2.1 — Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям МСУ-231 и MODIS

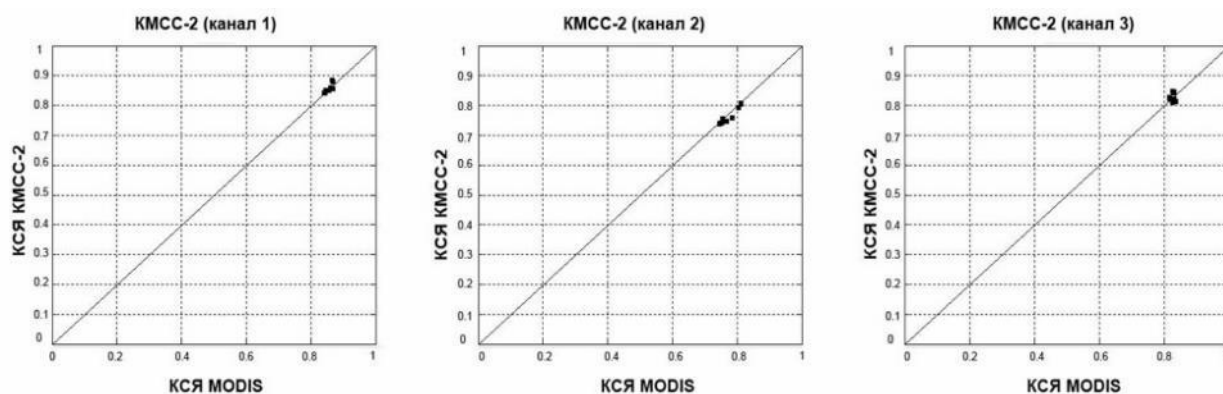


Рисунок 6.1.2.2 — Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям МСУ-232 и MODIS

В таблице 6.1.2.2 приведены результаты сопоставления КСЯ природных объектов в спектральных каналах КМСС-2 по данным КМСС-2 и MODIS/Aqua.

Таблица 6.1.2.2 — Сопоставление КСЯ в спектральных каналах КМСС-М по данным КМСС-2 и MODIS/Aqua

Параметры	Канал 1 (640–690 нм)	Канал 2 (785–900 нм)	Канал 3 (520–590 нм)
<i>МСУ-231</i>			
СКО КСЯ	0,009	0,015	0,007
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ}=0,995 \cdot \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ}=0,982 \cdot \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ}=0,998 \cdot \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1, %	–0,5	–1,8	–0,2
<i>МСУ-232</i>			
СКО КСЯ	0,009	0,015	0,014
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ}=1,0007 \cdot \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ}=0,983 \cdot \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ}=0,9993 \cdot \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1, %	0,07	–1,7	–0,07

Отклонение коэффициента регрессии от единицы можно рассматривать как отклонение абсолютной радиометрической калибровки камер КМСС-2 и MODIS. Отклонение коэффициента регрессии от единицы по проведенным измерениям и вычислениям составляет по модулю 0,07–1,8 % в зависимости от спектрального канала. СКО КСЯ по данным не превышает 0,015. Разброс значений КСЯ около линии регрессии можно объяснить различием условий наблюдения объектов этими сенсорами.

### 6.1.3 Сведение лучей визирования высокочастотных каналов МТВЗА-ГЯ

В ходе работы по созданию алгоритма восстановления интенсивности осадков на основе его измерений (см. разд. 5.1) было обнаружено расхождение в геопривязке канала 91,65 ГГц российского микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-2). Для анализа зон осадков используется оценка с названием «индекс рассеяния»,  $SI$ , которая вычисляется как разница между некоторой функцией  $F$  и радиояркостной температурой на вертикальной поляризации канала 91,65 ГГц. Указанная функция  $F$  характеризует, каким могло бы быть излучение на частоте 91,65 ГГц в отсутствии осадков (гидрометеоров). Эта функция может быть построена различными способами комбинирования каналов низкочастотной группы, которые не чувствительны

или менее чувствительны к осадкам. Восходящее радиоизлучение на частоте 91 ГГц при наличии гидрометеоров претерпевает многократное рассеяние, вследствие чего радиояркая температура уменьшается. Поэтому при наличии осадков индекс рассеяния увеличивается пропорционально интенсивности осадков.

При анализе зон осадков было обнаружено, что появляются области, в которых индекс рассеяния отрицательный, что в условиях поставленной задачи физически невозможно. Более того, анализ разных периодов показал систематическое смещение указанных областей с отрицательным индексом рассеяния в направлении полёта прибора. Таким образом, для восходящих витков смещение наблюдается вверх, для нисходящих — вниз. Наблюдаемые эффекты могут свидетельствовать только о присутствии дополнительного угла тангажа в ориентации луча визирования частотного канала 91,65 ГГц.

Общая идея метода корректировки заключается в определении углов, при которых минимизируется суммарное отрицательное значение индекса рассеяния  $SI$  для всех выделенных областей осадков за один день наблюдений. От основного метода геопривязки, развитого в работах 2022 г., она отличается идеологически только оцениваемым параметром. Алгоритм поиска корректирующих углов был применён при обработке данных МТВЗА-ГЯ, полученных за 2020 г. Набор данных составил 281 сутки измерений. Из этого массива суммарно было выделено 3448 зон осадков для восходящих витков и 4166 для нисходящих витков. Средние значения и СКО полученных за анализируемый период параметров составили: угол крена  $(-0,37 \pm 0,71)^\circ$ , угол тангажа  $(-0,09 \pm 0,65)^\circ$  и угол рыскания  $(-1,21 \pm 0,76)^\circ$  (рисунок 6.1.3.1). Средняя точность в данном случае составляет  $11,515 \pm 11,08$  км.

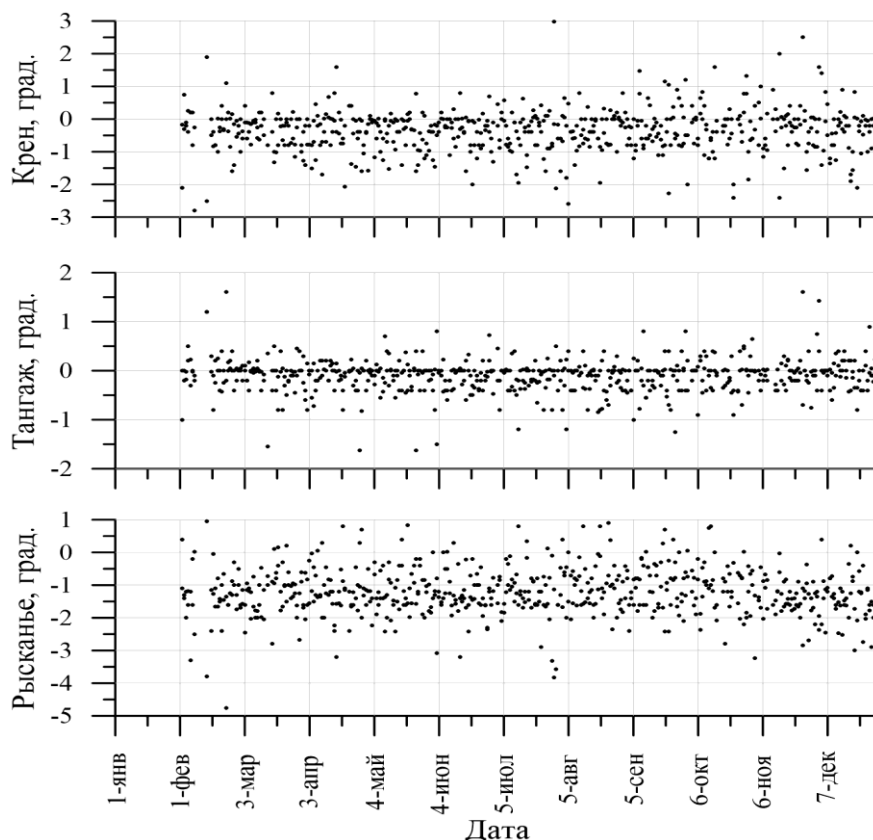


Рисунок 6.1.3.1 — Результаты определения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания по данным измерений МТВЗА-ГЯ на частоте 91,65 ГГц (V) за 2020 г. Каждая точка — результат обработки данных за одни сутки

Оценка полученных карт (рисунок 6.1.3.2) показала, что после коррекции береговая линия на радиометрических изображениях сместилась по направлению условной

траектории движения спутника как для восходящих, так и для нисходящих полувитков. Это обеспечило лучшее совпадение с географической береговой линией. Континент Австралия выбран в качестве наглядного примера.

Для схемы сканирования МТВЗА-ГЯ смещение горизонтальной береговой линии вдоль направления движения спутника определяется углом тангажа. Поэтому была выполнена дополнительная серия расчётов при дополнительной коррекции угла тангажа на  $+0,1$ ;  $+0,2$  и  $+0,3^\circ$  (относительно найденного в автоматическом режиме значения  $-0,09^\circ$ ). При увеличении угла тангажа расстояние между средними значениями береговых линий, определённых по восходящим и нисходящим полувиткам, сокращается и при коррекции  $+0,3^\circ$  становится нулевым.

Суммарная точность географической привязки с коррекцией тангажа  $+0,3^\circ$  составила  $7,62 \pm 10,64$  км, что почти вдвое лучше, чем с нулевой коррекцией. Рекомендуется использовать следующие значения корректирующих углов для группы каналов 52 — 91 ГГц МТВЗА-ГЯ: крен ( $-0,37 \pm 0,71$ ) $^\circ$ , тангаж ( $0,21 \pm 0,65$ ) $^\circ$  и рыскание ( $-1,21 \pm 0,76$ ) $^\circ$ .

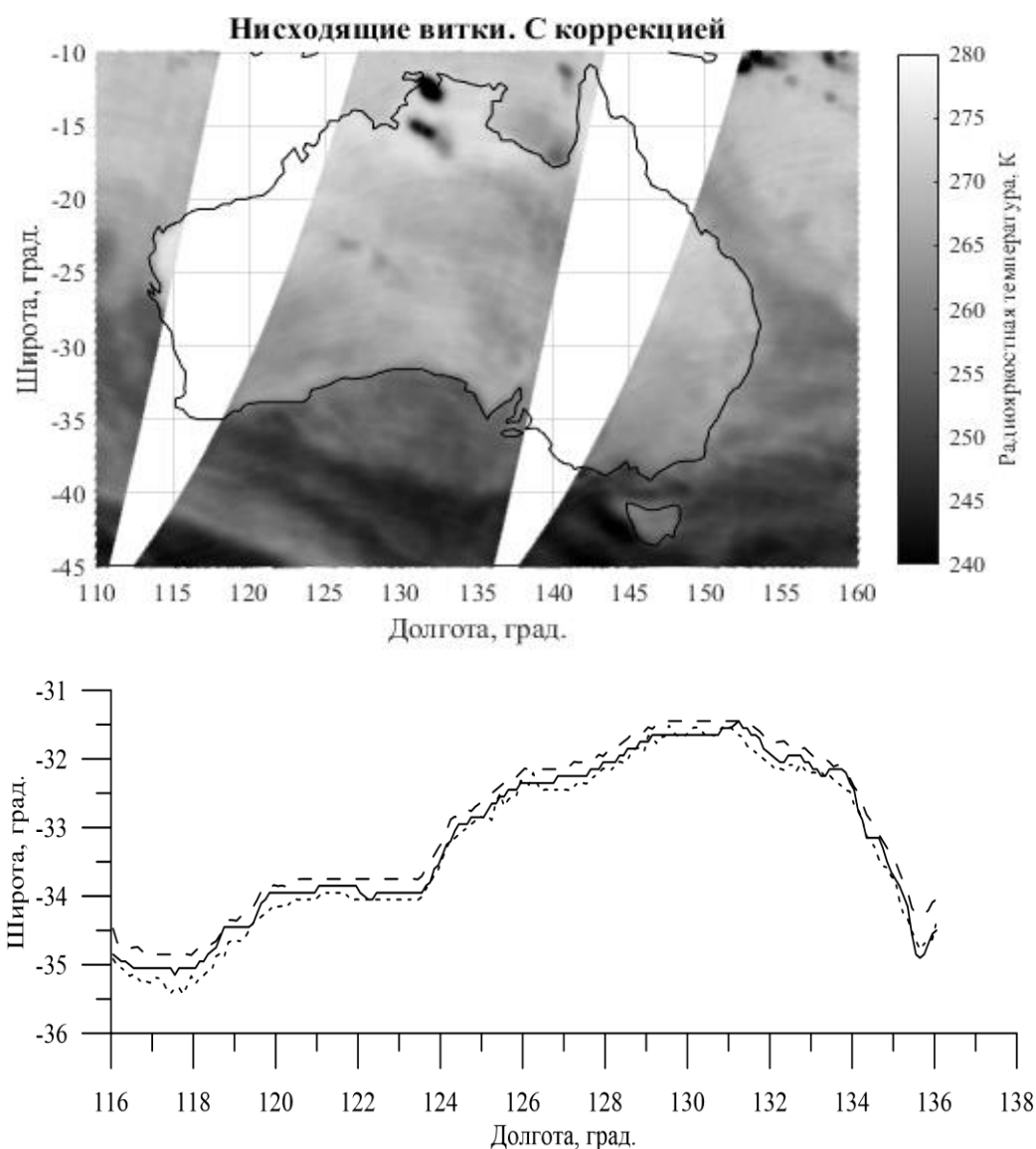


Рисунок 6.1.3.2 — Восстановленные береговые линии для Австралии. Вверху — радиотепловой портрет и точная географическая береговая линия. Внизу — определённые береговые линии. Найденные береговые линии с геопривязкой по областям осадков: пунктир — по восходящим виткам; точки — по нисходящим виткам; сплошная — точная береговая линия

#### **6.1.4 Развитие программных средств обработки данных измерений радиометра-спектрометра P22M**

*Работа выполнялась совместно с Фрязинским филиалом Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН), Фрязино*

В рамках развития методов и средств подспутниковых калибровочных измерений проведена доработка программно-алгоритмического обеспечения для обработки данных измерений радиометра-спектрометра P22M (разработка СКБ ИРЭ РАН и ФирЭ РАН, рисунок 6.1.4.1) в соответствии с предложенным ранее алгоритмом коррекции измеряемых спектров микроволнового излучения в диапазоне частот 18–27,2 ГГц. Этот диапазон волн содержит линию резонансного поглощения излучения атмосферным водяным паром (около 22,2 ГГц), в связи с чем соответствующие частотные каналы (19 и 22 ГГц и др.) включаются в стандартный набор измерительных каналов большинства спутниковых СВЧ-спектрометров, в том числе, российского прибора МТВЗА-ГЯ.

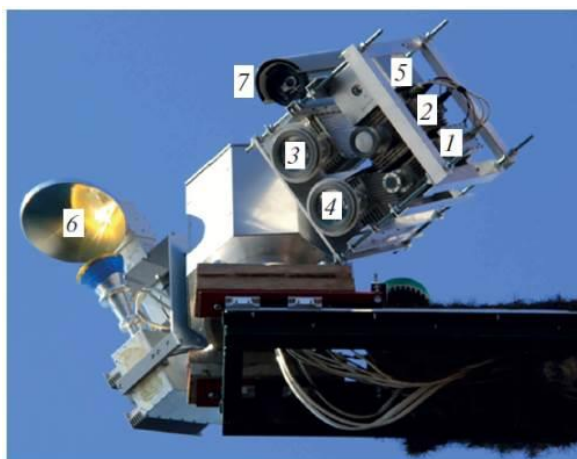


Рисунок 6.1.4.1 — Радиометр-спектрометр P22M в составе радиометрического комплекса во время подспутниковых экспериментов на океанографической платформе: (1–6) — комплект радиометров, 7 — видеокамера

Циклограмма работы P22M предполагает измерение сигнала с последовательным смещением центральной частоты на 200 МГц. В результате длительность полного рабочего цикла составляет около 11 с. В ряде случаев измерения в различных спектральных каналах в интервале 11 с нельзя считать синхронными (как правило, это связано с изменчивостью атмосферных условий, либо с необходимостью точного совмещения во времени измерений нескольких приборов).

Для построения на основе фактических измерений P22M квазисинхронных спектров по ранее предложенному алгоритму было доработано программно-алгоритмическое обеспечение потоковой обработки данных P22M. В результате обеспечена возможность построения квазисинхронных спектров микроволнового излучения в диапазоне 18–27,2 ГГц с шагом по частоте 0,2 ГГц в реальном масштабе времени (при переходе между последовательными сеансами съёмки).

В настоящее время радиометр-спектрометр P22M используется для длительных измерений микроволнового спектра собственного радиотеплового излучения атмосферы в непрерывном режиме при фиксированном угле наблюдений, а также в составе сканирующего микроволнового измерительного комплекса при подспутниковых измерениях на океанографической платформе. Прорабатывается вопрос его использования в судовых подспутниковых измерениях ледяного покрова, морской поверхности и атмосферы в Арктике.



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

### 6.2.1 Разработка методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем наблюдения Земли из космоса, в том числе вопросов связанных с глобальными процессами

Последние десятилетия в мире наблюдается значительный рост количества и мощности погодных аномалий.

Одной из наиболее очевидных климатических аномалий становится быстрое уменьшение площади северной полярной «шапки». По некоторым прогнозам, северная полярная «шапка» через несколько десятков лет может почти полностью исчезнуть из-за идущего на планете потепления. Его причиной считается антропогенный фактор.

Положительный годовой энергобаланс приводит к повышению температуры и таянию «шапки», отрицательный годовой баланс — к понижению температуры и росту «шапки». Осреднение процесса на большом интервале времени приводит к изменению температуры в окрестности соответствующих полярных шапок. Поэтому правильность рассмотренной модели может подтверждаться путем сравнения графиков дисбаланса энергии с графиками изменения реальных температур на том же интервале времени в Антарктике и в Арктике. Результаты такого сравнения приведены на рисунках 6.2.1.1 и 6.2.1.2.

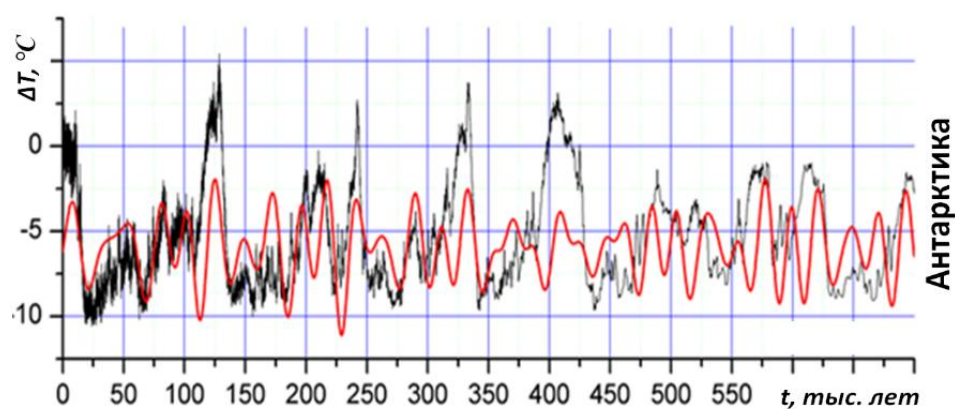


Рисунок 6.2.1.1 — Вариации температуры в Антарктике (черная кривая), оцененные по анализу ледовых кернов на куполе С, и энергобаланс Антарктики (красная кривая)

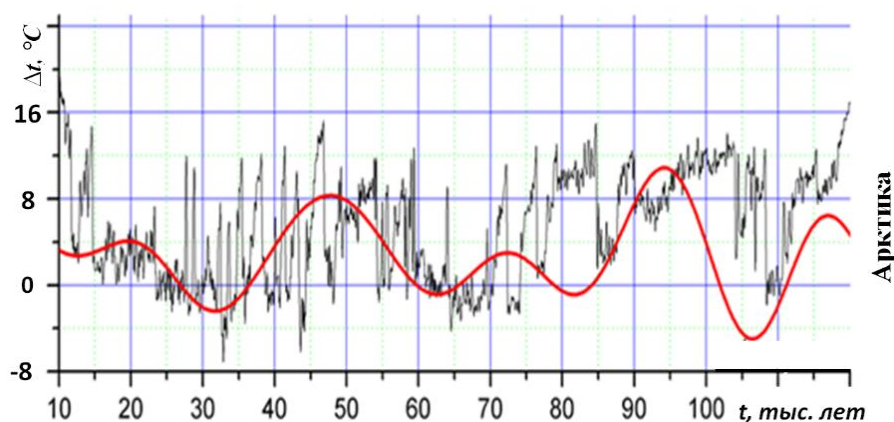


Рисунок 6.2.1.2 — Вариации температуры в Арктике, оцененные по анализу ледовых кернов, взятых в Гренландии (чёрная кривая), и энергобаланса Арктики (красная кривая).

Горизонтальная ось — это возраст льда, соответствующий интервалу времени от 120 тыс. лет до 10 тыс. лет до нашего времени

Значения интеграла дисбаланса энергии зон полярных дней и ночей являются оценками космической составляющей регулирования изменения размеров полярных шапок. А изменения интеграла дисбаланса энергии косвенно характеризуют изменения размеров полярных шапок. На эту составляющую изменения размеров полярных шапок могут накладываться и другие внутренние факторы изменений в климатической системе, например, изменения в общей циркуляции атмосферы или изменения в теплообмене океан-атмосфера, влияющие на тепловой баланс в области полярных шапок. На рисунках 6.2.1.3 и 6.2.1.4 для Северного и Южного полушарий приведены графики изменения космических составляющих размеров полярных шапок —  $S_{пш}$  (в сопоставимых условных единицах) относительно их среднего значения, на которые наложены известные графики концентрации пыли во льду Гренландии (рисунок 6.2.1.3) и на куполе С в Антарктиде (рисунок 6.2.1.4). На рисунках 6.2.1.3 и 6.2.1.4 по горизонтальной оси положительные значения — это возраст льда в тысячелетиях в кернах, по которым получены сведения о пыли, т.е. время в тысячелетиях в прошлое. А отрицательные значения на горизонтальной оси — это будущее время в тысячелетиях.

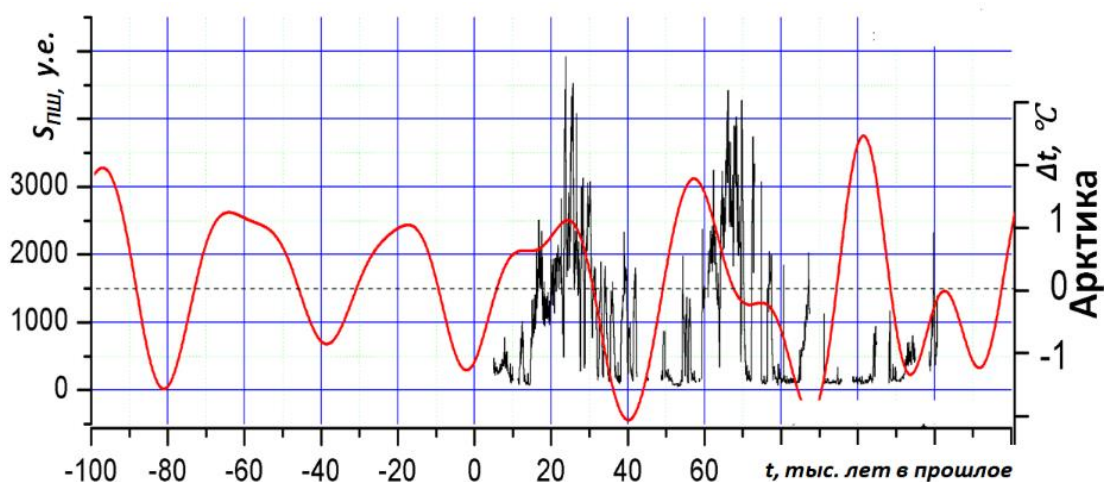


Рисунок 6.2.1.3 — График космической составляющей размеров северной полярной шапки (в условных единицах) относительно ее среднего значения (красная кривая) и график концентрации пыли во льду Гренландии (чёрная кривая)

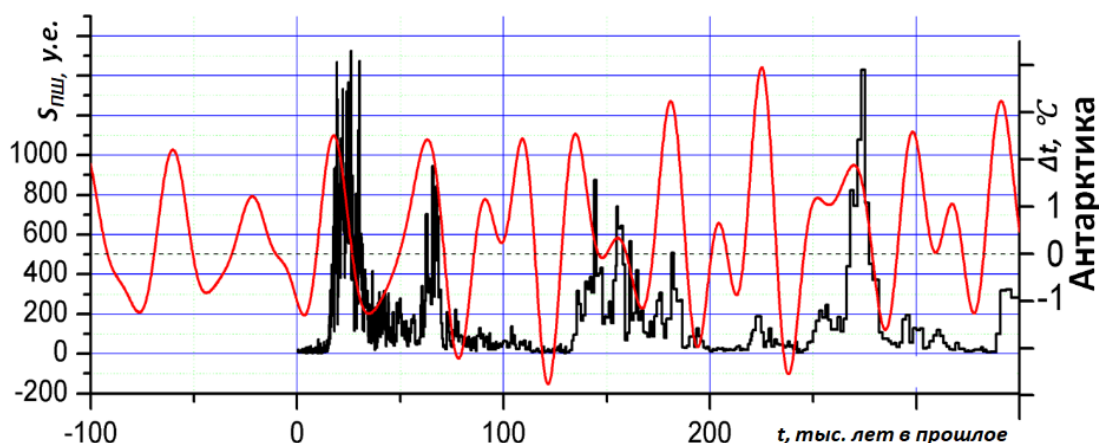


Рисунок 6.2.1.4 — График космической составляющей размеров южной полярной шапки (в условных единицах) относительно ее среднего значения (красная кривая) и график концентрации пыли во льду Антарктики (чёрная кривая)

Таким образом, можно сделать вывод, что реальное изменение оледенения определяется как космическим фактором, так и земными. При отсутствии сильных

повышений температуры, обусловленных земными регуляторами, степень оледенения полярных шапок, в основном, определяется космическим фактором регулирования. Однако другие, чисто внутренние процессы в климатической системе, приводящие к повышению температуры, могут замедлить или вовсе остановить рост оледенения.

Площадь южной полярной шапки в настоящее время меньше среднего значения. В соответствии с изменением космического фактора (рисунки 6.2.1.3, 6.2.1.4), можно ожидать, что далее оледенение в Южном полушарии будет усиливаться в течение последующих около 20 тыс. лет, если в процесс не вмешается потепление, обусловленное другими факторами.

В качестве одного из космических регуляторов климата Земли рассмотрен дисбаланс энергии инсоляции зон полярного дня и энергии излучения зон полярной ночи, влияющий на вековое изменение размеров полярных шапок. Определена зависимость энергетического дисбаланса зон полярных дней и ночей от параметров орбиты Земли: наклона, эксцентриситета, угла прецессии.

Проведено сравнение полученных графиков дисбаланса энергии зон полярных дней и ночей для Южного и Северного полушарий с известными графиками температур полярных областей, оцененных по результатам анализа ледовых кернов, взятых в Антарктиде и Гренландии. Отмечена синхронность графиков температуры Антарктики и Арктики, оцененной по анализу ледовых кернов с полученными графиками энергодисбаланса полярных зон Антарктики и Арктики.

Получены алгоритмы определения многовековых колебаний размеров полярных шапок Земли относительно их средних значений, обусловленных дисбалансом энергопотока зон полярных дней и ночей, в зависимости от наклона, эксцентриситета и угла прецессии.

Предложенный метод определения влияния космических факторов на климат, проверенный по объективным данным прошлого, позволяет осуществлять прогноз многовековых будущих климатических изменений.

Сделано предположение, что в обозримом будущем изменения параметров орбиты Земли и наклона оси ее вращения по отношению к плоскости эклиптики, а также прецессии, на протяжении ближайших трех тысячелетий будут способствовать медленному таянию северной полярной шапки. Затем снова появится тенденция для нового роста северной полярной шапки. Предполагается также, что в Южном полушарии уже сформировалась тенденция усиления оледенения. Под влиянием космического фактора она будет усиливаться в течение последующих 20 тыс. лет.

### ***6.2.2 Детектирование пожаров по данным МСУ-МР на основе алгоритма MOD14***

В рамках темы «Мониторинг» в 2022 г. была начата работа по адаптации алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР установленного на российском спутнике «Метеор-М» № 2-2. В результате проведенных работ разработанный метод детектирования пожаров были интегрирован в информационную систему «Вега-Science» (уникальная научная установка, входящая в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг», <http://sci-vega.ru/>). В этом году работы были продолжены и посвящены диагностике и отладке ошибочных случаев, возникавших в ходе потоковой обработки данных МСУ-МР. Важным продвижением в этом направлении стало определение общего процесса адаптации MOD14 для работы с данными других спутников. Это позволило систематизировать работу по отладке алгоритма, получить достаточно достоверные оценки точности его работы, и заложить основу для систематического подхода при проведении подобной адаптации для данных с других спутников (FY-3D, FY-3E, Sentinel-3A, Sentinel-3B) Схема процесса представлена на рисунке 6.2.2.1.

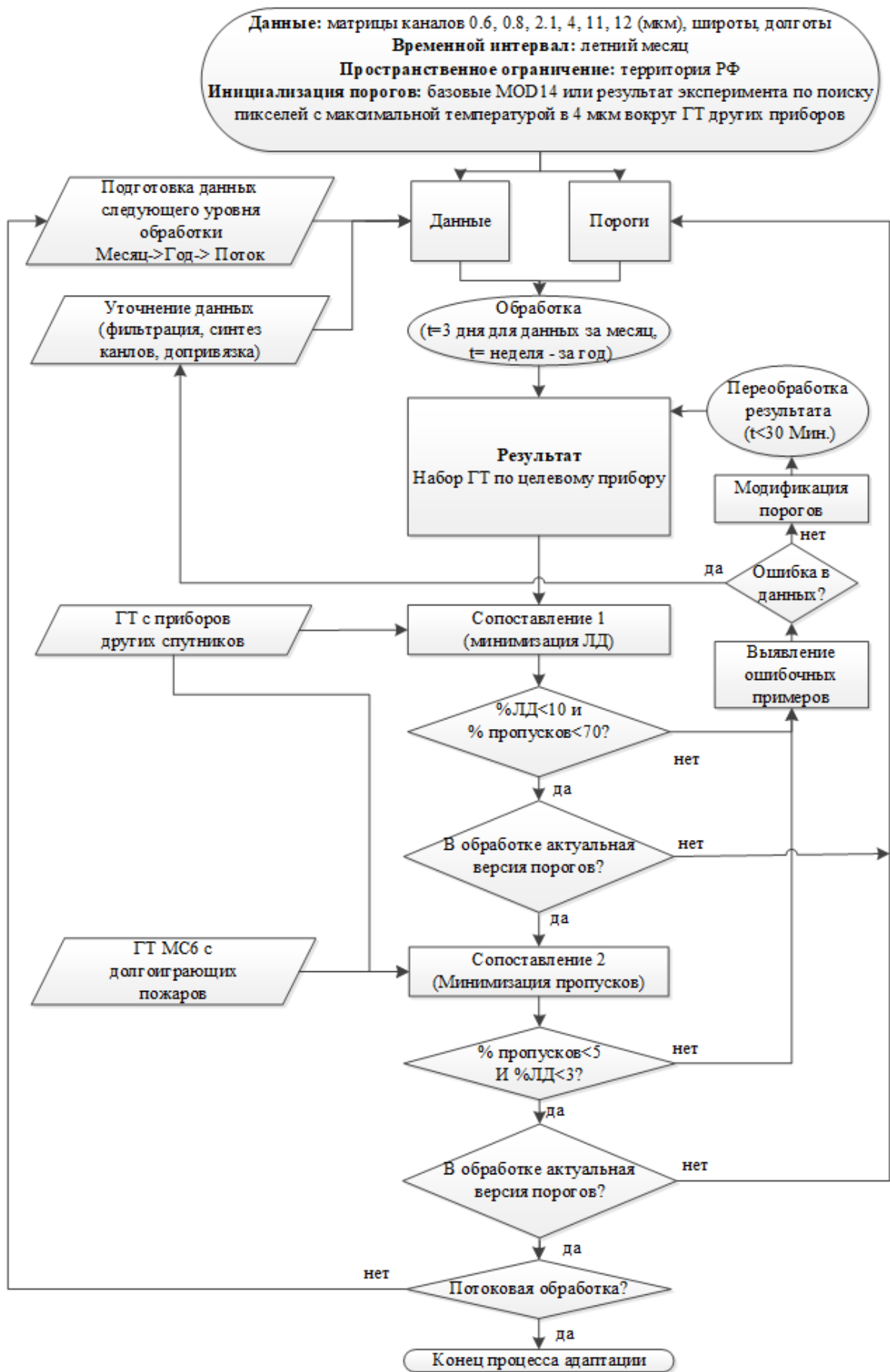


Рисунок 6.2.2.1 — Схема процесса адаптации алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными других спутников

Общий принцип данного процесса заключается в итерационном подходе — каждый шаг внешнего цикла соответствует увеличению объема данных, на котором проводится калибровка алгоритма (пожарный месяц, год или потоковая обработка). Каждый такой шаг состоит из непосредственной обработки соответствующих данных алгоритмом MOD14 с актуальной версией порогов и проверки получаемых результатов детектирования ГТ. В случае несоответствия результата поставленным критериям выявляются ошибочные случаи, по которым определяется, являются ли они следствием ошибок в самих данных (помехи, ошибочные значения, ошибка привязки данных) или следствием неправильно подобранных порогов. Далее либо происходит уточнение данных (фильтрация помех, синтез каналов изображения, допривязка изображения), либо модифицируются пороги. В случае модификации порогов в целях экономии времени далее переобрабатываются не исходные данные (набор каналов сцен вместе с матрицами широт и долгот), а прошлый результат детектирования. При успешном прохождении новым результатом проверки качества, текущая версия порогов становится актуальной и происходит переобработка исходных данных.

Остановимся подробнее на оценке качества детектированных ГТ (далее — целевые ГТ). Она происходит в два этапа (на рисунке 6.2.2.1 сопоставление 1 и сопоставление 2). На первом этапе целевые ГТ сопоставляются с ГТ с приборов других спутников (далее проверочные ГТ). Если в радиусе в  $0,01^\circ$  от целевых ГТ в течение суток со времени детектирования не было зарегистрировано ни одной проверочной ГТ, такие целевые ГТ определяются как ЛД. Одновременно с этим, наоборот, если подобным образом рядом с проверочными ГТ не было обнаружено ни одной целевой ГТ, такие случаи фиксируются как потенциальные пропуски результата. Таким образом, принимая проверочные ГТ за ожидаемый результат работы модифицированного MOD14 на сценах целевого прибора, оценивается ошибка ложных детектирований и ошибка пропусков алгоритма. Однако, на первом этапе оценка пропусков имеет в себе довольно большую неопределенность, связанную с тем, что спутник, данные которого были обработаны модифицированным алгоритмом, мог чисто физически не обзирать проверочные ГТ. На практике оказалось, что неопределенность для обратного сопоставления (проверка целевых ГТ на ЛД) намного меньше. Это связано с тем, что в данном сопоставлении участвует результат, получаемый по данным с одного спутника с одной стороны и ГТ со всех остальных доступных спутников с другой. Критерием качества результата при сопоставлении 1 является доля ЛД, не превышающая 10 % и доля пропусков, не превышающая 70%. Таким образом, основная цель первого этапа — минимизация ЛД. Важно отметить, что сопоставление 2 не может быть проведено без предварительного уменьшения количества ЛД ниже обозначенного значения.

В случае успешного прохождения первого сопоставления, после актуализации версии порогов, результат сопоставляется с ГТ с долгоиграющих пожаров (пожары — группы ГТ объединенных по пространству и времени, долгоиграющие пожары — длительностью более семи дней). Длительное развитие таких пожаров сводит до минимума описанную ранее неопределенность в оценке пропусков. Вместе с тем, ЛД в сопоставлении 2, как и в сопоставлении 1 оцениваются для всех доступных целевых ГТ по всем проверочным ГТ. Критерием качества результата при сопоставлении 2 являются доля пропусков, не превышающая 10 % и доля ЛД, не превышающая 3 %. Целью второго этапа является минимизация пропусков при одновременном уменьшении ЛД. Успешное прохождение данного сопоставления при актуальной версии порогов означает либо переход на следующий шаг внешнего цикла, либо окончание процесса адаптации в случае, если проверке подвергались данные, получаемые в потоковом режиме.

Описанное сопоставление 2 было проведено для результата работы модифицированного MOD14 на всех доступных сеансах МСУ-МР за 2022 г., покрывающих территорию РФ. Результат сравнения представлен в таблице 6.1.2.1. В соответствии с логикой сопоставления 2, при оценке ошибки ЛД все полученные ГТ



МСУ-МР сопоставлялись со всеми доступными ГТ MODIS (столбец ГТ МСУ-МР). При оценке ошибки пропусков ГТ MODIS, относящиеся к долгоиграющим пожарам, сопоставлялись со всеми полученными ГТ МСУ-МР (столбец ГТ MODIS). Для уточнения оценки пропусков визуально было проанализировано 101 пожар MODIS, для которых не было сопоставлено ни одной ГТ МСУ-МР. В результате анализа оказалось, что только 19 % таких пожаров были видны на сеансах МСУ-МР. Таким образом, оценку пропусков удалось уточнить. Полученные цифры подтверждают ранее сделанные выводы о применимости разработанного метода для задачи глобального мониторинга пожаров.

Таблица 6.2.2.1 — Сопоставление ГТ МСУ-МР и MODIS на территории РФ за 2022 год

	ГТ МСУ-МР		ГТ MODIS		Ошибки для МСУ-МР, %		
	Сопост. с MODIS	Не сопост. с MODIS	Сопост. с МСУ-МР	Не сопост. с МСУ-МР	Ошибка ЛД	Ошибка пропусков	Уточненная ошибка пропусков
Всего	78 842	6216	56 406	1745	7,3	3,0	0,57
Лесных	61 895	1848	49 724	911	2,9	1,8	0,37

### **6.2.3 Отработка процедуры автоматического контроля корректности работы МТВЗА-ГЯ**

Внимание членов научного коллектива в направлении повышения качества обработки данных российского микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-2) было сосредоточено на решении трёх основных задач:

1. Корректировка географической привязки низкочастотных каналов МТВЗА-ГЯ.
2. Оценка возможности использования контроля качества геопривязки в качестве индикатора корректности работы МТВЗА-ГЯ.
3. Исследование возможности устранения ошибок геопривязки высокочастотных каналов МТВЗА-ГЯ, возникающих в результате ошибок в реализации аппаратного сведения лучей визирования прибора.

Перечисленные задачи являются логическим продолжением работ коллектива, выполненных в 2022 г. Была детально описана технология географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ; был предложен алгоритм поиска корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, устраняющих расхождение ориентации системы координат космического аппарата («Метеор-М» № 2-2) и приборной системы координат МТВЗА-ГЯ. Применение указанного алгоритма при обработке всего массива измерений, полученных МТВЗА-ГЯ за 2020 г., позволило оценить соответствующие корректирующие значения этих углов:  $(-0,84 \pm 0,15)^\circ$  для угла рыскания,  $(-0,44 \pm 0,14)^\circ$  для угла крена и  $(+1,13 \pm 0,05)^\circ$  для угла тангажа. Было показано, что введение указанных углов в процедуру географической привязки МТВЗА-ГЯ позволяет практически в пять раз повысить её точность. Так, среднее расхождение береговых линий, заимствованных из высокоточных географических баз данных и восстановленных по радиометрическим портретам, при выполнении корректировки географической привязки составляет 4,5 км.

Важным достижением 2023 г. представляется внедрение указанных корректирующих углов в процедуру первичной обработки данных МТВЗА-ГЯ до уровня L1B, выполняемую разработчиками аппаратуры (АО «Российские космические системы») с использованием созданного ими программного комплекса предварительной обработки измерений. Основной проблемой при этом было устранение расхождений между используемыми системами координат. В ходе работ было выяснено, что для реализации процедуры геопривязки комплекс предварительной обработки измерений использует «классические» определения систем координат (СК), используемых для ориентации космических аппаратов (в данном контексте имеются в виду: орбитальная скоростная СК, СК космического аппарата, приборная СК). В свою очередь, предложенный в 2022 г.

алгоритм использует их альтернативное определение. В результате выполненных работ коллективу ИКИ РАН удалось выявить имеющиеся расхождения и выполнить процедуру согласования полученных результатов с программным комплексом АО «Российские космические системы». Соответственно, в настоящее время, данный комплекс использует корректные поправочные углы и обеспечивает точность геопривязки, указанную выше.

Полученные научным коллективом результаты в области повышения точности географической привязки данных МТВЗА-ГЯ позволили перейти к следующему этапу исследований — отработке процедуры автоматического контроля корректности работы этого инструмента. Предпосылкой выполнения этих работ стало обращение сотрудников НИЦ «Планета» на предмет анализа результатов измерений, выполняемых МТВЗА-ГЯ в период 1–15 апреля 2022 г. В ходе исследования было показано, что с 10 по 14 апреля 2022 г. положение береговой линии на радиометрических портретах менялось хаотическим образом и к 15 апреля приобрело устойчивый эффект, составляющий порядка 70 км расхождения с истинной географической береговой линией. Рассмотрение более длительного временного интервала позволило продемонстрировать, что сбой продолжался до 23 мая, после чего постепенно к 25 мая, характеристики геопривязки вернулись к своим стандартным значениям.

Первым этапом анализа выявленного сбоя были работы по визуальному выявлению причин наблюдаемых расхождений. В ручном режиме было просмотрено порядка 170 радиометрических изображений, соответствующих отдельно взятым полувиткам (как восходящим, так и нисходящим). Поскольку изменение угла рыскания прибора приводит к характерному смещению радиометрических портретов по/против часовой стрелки относительно фиксированной подспутниковой точки, возникновение дополнительного угла рыскания прибора было определено в качестве основной причины сбоя. С целью детального изучения характера поведения углов крена, тангажа и рыскания МТВЗА-ГЯ во время сбоя была проведена операция их посуточного определения в соответствии с разработанной методикой. Полученные результаты подтвердили гипотезу об изменении угла рыскания на постоянную величину, составившую на период сбоя порядка  $-2^\circ$  (рисунок 6.2.3.1). При этом углы тангажа и крена сохранили свои прежние значения.

Результаты проведённых в 2023 г. работ позволяют сделать следующие выводы:

- В ходе обработки данных МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-2) обнаружен сбой геопривязки в период с 10 апреля по 25 мая 2022 г. (затронувший, в большей степени, угол рыскания — порядка  $2^\circ$ ).
- С 10 по 14 апреля происходило постепенное изменение характеристик какого-то элемента системы (скорее всего, отвечающего за формирование временных меток), достигшее своих предельных значений к 15 апреля; в таком режиме осуществлялась работа комплекса до 23 мая; в период с 23 по 25 мая в результате корректировки (или самопроизвольно) параметров вышедшей из строя системы ошибка была устранена; начиная с 26 мая комплекс МТВЗА-ГЯ вернулся к параметрам, предшествующим сбою.
- Проведённые исследования продемонстрировали возможность использования процедуры поиска корректирующих геопривязку углов для контроля корректности работы отдельных систем МТВЗА-ГЯ.
- Достоверное обнаружение ошибок, исходя из идеологии разработанного алгоритма, возможно спустя 24 ч начиная с момента достижения системой некоторого «стабильного» состояния.
- Продемонстрирована возможность коррекции геопривязки при выявлении подобных сбоев при наличии необходимого минимума измерений. В рассмотренном случае — около 1 мес. Точность корректировки будет определяться репрезентативностью набора имеющихся данных, поэтому речь идёт только о ретроспективной коррекции.
- Компенсация ошибок в «переходные» периоды — невозможна.

Следует особо подчеркнуть, что необходимо стремиться к обеспечению максимальной доступности информации о подобных сбоях для возможности внесения соответствующих корректив в разрабатываемые системы потоковой обработки данных приборов серии МТВЗА-ГЯ.

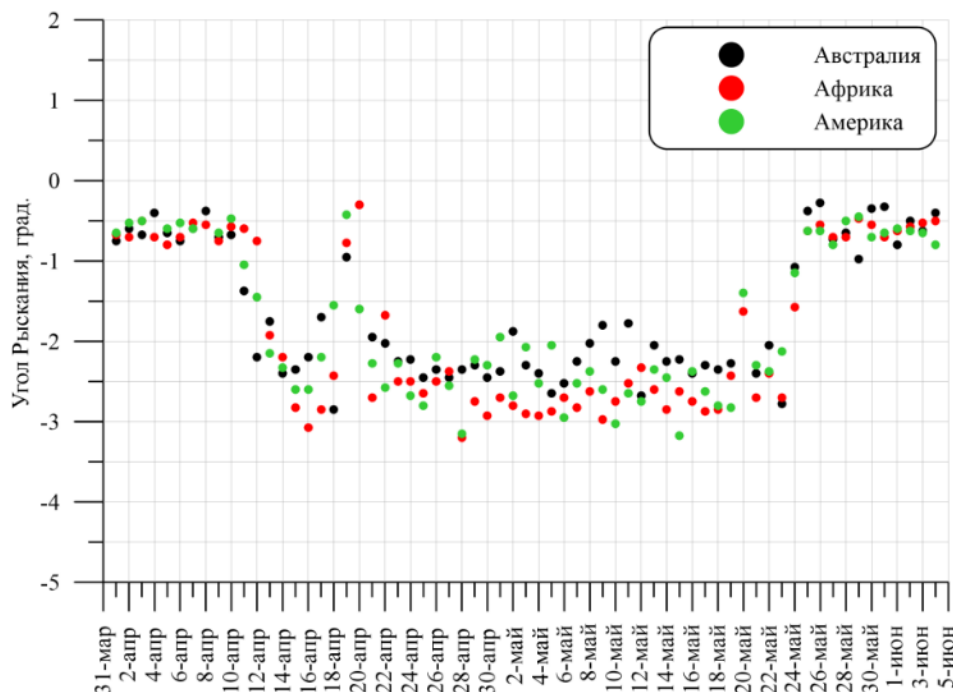


Рисунок 6.2.3.1 — Значения корректирующего угла рыскания, найденные в результате анализа данных МТВЗА-ГЯ, за период с 31 марта по 5 июня 2022 года. Цвет точек соответствует трём различным тестовым полигонам

#### ***6.2.4 Анализ возможностей использования космической системы «Арктика-М» для мониторинга природных пожаров на примере анализа данных 2023 года***

В настоящее время в России создается уникальная высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система (ВГКС) «Арктика-М» (Асмус и др., 2021), предназначенная для информационного обеспечения, решения задач оперативной метеорологии, гидрологии, агрометеорологии, мониторинга климата и окружающей среды в арктическом регионе. Аналогов подобных систем в мире пока не существует. Первый космический аппарат, входящий в состав данной системы («Арктика-М» № 1), был запущен 21 февраля 2021 г. Принципиальной особенностью данной системы является то, что она должна обеспечивать непрерывное (1 раз в 15 мин) наблюдение северных территорий. Когда в эксплуатацию будет введен второй аппарат системы («Арктика-М» № 2), система фактически обеспечит возможность непрерывного мониторинга практически всей территории России. Следует отметить, что входящая в состав ВГКС «Арктика-М» аппаратура наблюдения Земли потенциально может позволить решать не только метеорологические задачи. Система, в частности, может представлять интерес для решения задач мониторинга природных пожаров, тем более что основной установленный на ней прибор МСУ-ГС/ВЭ позволяет получать данные в диапазонах 3,5–12,5 мкм, которые традиционно используются для детектирования пожаров. В тоже время, система обладает невысоким пространственным разрешением (4×4 км), что, безусловно, ограничивает возможности ее применения для решения задач мониторинга пожаров. Поэтому для оценки возможности применения ВГКС «Арктика-М» для мониторинга природных, в первую очередь лесных, пожаров и определения возможных направлений

использования получаемой информации для решения данной задачи был проведен анализ данных, полученных в пожароопасном сезоне 2023 г. и сравнение их с информацией дистанционного мониторинга пожаров, получаемой на основе других спутниковых систем. Основные результаты проведенного анализа представлены в данном кратком сообщении.

Проведенный анализ основывался на сравнение информации, получаемой в системе ИСДМ-Рослесхоз (<https://nffc.aviales.ru>), обеспечивающей мониторинг пожаров на всей территории России Российской Федерации в интересах Федерального агентства лесного хозяйств Российской Федерации и данных спутника «Арктика-М» № 1. Следует отметить, что эти данные оперативно поступают в ИСДМ-Рослесхоз, поступление их в систему обеспечивает полностью автоматизированная обработка данных, реализованная в НИЦ «Планета». Система ИСДМ-Рослесхоз обеспечивает оперативное автоматическое дистанционное детектирование лесных пожаров и оценку площадей, пройденных огнем на основе данных приборов MODIS (спутники Terra и Aqua) и VIIRS (спутники Suomi NPP и JPSS1). Используемая в системе технология дистанционного мониторинга действующих пожаров достаточно подробно описана в работе.

*Качественная оценка* возможности наблюдения действующих пожаров с использованием данных спутника «Арктика-М» № 1. Оценка проводилась путем визуального сравнения информации о пожарах детектированных ИСДМ-Рослесхоз и данных прибора МСУ-ГС/ВЭ. Оценка показала, что во многих случаях на данных спутника «Арктика-М» № 1 в местах действия пожаров, детектированных и контролируемых ИСДМ-Рослесхоз наблюдаются ярко выраженные тепловые аномалии. Один из таких примеров приведён на рисунке 6.2.4.1., где показан пример данных, полученных прибором МСУ-ГС/ВЭ в канале 3,5–4 мкм в 15:00 GMT 09.08.2023 (растровое изображение), на которые наложены данные о действующих (в зоне которых в течение суток было детектировано горение) пожарах, зарегистрированных ИСДМ-Рослесхоз 09.08.2023 (красные контура и зоны горения, зарегистрированные в соответствующие сутки). Темные зоны на данных прибора МСУ-ГС/ВЭ соответствуют горячим участкам поверхности, которые, в основном, связаны с зонами горения. Хорошо видно, что такие участки наблюдаются в зонах пожаров различной площади. То есть прибор МСУ-ГС/ВЭ позволяет увидеть зоны горения и потенциально для него могут быть построены алгоритмы их детектирования.

Для более детальной оценки возможностей по наблюдению природных пожаров с использованием ВГКС «Арктика-М» была проведена *количественная оценка вероятности наблюдения очагов горения различной площади* прибором МСУ-ГС/ВЭ. Она осуществлялась на основе сравнения данных о зонах горения в конкретные сутки, детектированных в ИСДМ-Рослесхоз и данных, полученных ВГКС «Арктика-М» в анализируемые сутки. Для этого на основе данных прибора МСУ-ГС/ВЭ за конкретные сутки сформировались растровые карты (изображения) в каждую точку которых заносилось максимальные значения в данной точке, наблюдавшиеся за анализируемые сутки. Подобные карты формировались по территории Ресублики Саха (Якутии) и Хабаровского края в координатах LL: Lat 119,53° в.д., Lon 49.87° с.ш. UR: Lat 149.88° в.д., Lon 71.7° с.ш. Эти изображения совмещались с зонами горения за те же сутки, полученными из ИСДМ-Рослесхоз. Пример такого совмещения приведен на рисунке 6.2.4.2. Во многих случаях на картах максимальных температур достаточно хорошо видны тепловые аномалии. В случае совпадения таких аномалий с зонами горения пожаров, которые формируются в ИСДМ-Рослесхоз, можно считать, что потенциально по данным МСУ-ГС/ВЭ может быть детектировано горение анализируемого пожара.

Для оценки вероятности наблюдения очагов горения различной площади по данным прибора МСУ-ГС/ВЭ было выбрано 5567 зон горения, детектированных за период с 1 июля по 17 сентября 2023 г. Данные были разбиты на семь классов. Для всех выбранных пожаров был проведен анализ соответствующих построенных карт

максимальных температур. В случае, если на карте в районе анализируемого пожара визуально наблюдалась явная тепловая аномалия, считалось, что анализируемый пожар потенциально мог бы быть детектирован на основе данных прибора МСУ-ГС/ВЭ. На основе полученной информации для каждой из выбранных групп пожаров с различной площадью суточного прироста горения была оценена вероятность обнаружения пожаров данной группы. Результаты анализа представлены на графике, приведенном на рисунке 6.2.4.3.

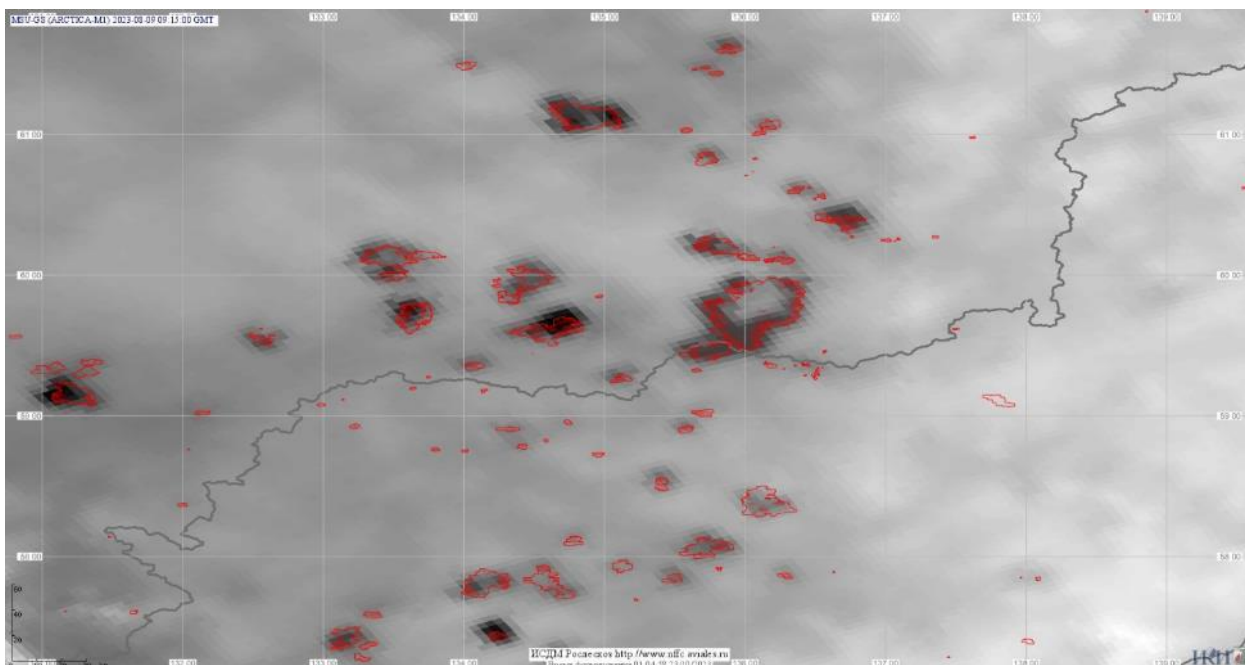


Рисунок 6.2.4.1 — Пример совпадения тепловых аномалий, наблюдаемых в канале 3,5–4 мкм прибора МСУ-ГС/ВЭ 15:00 GMT 09.08.2023 и данных о детектированных ИСДМ-Рослесхоз действующих лесных пожарах (красные контуры и зоны горения) за сутки 09.08.2023

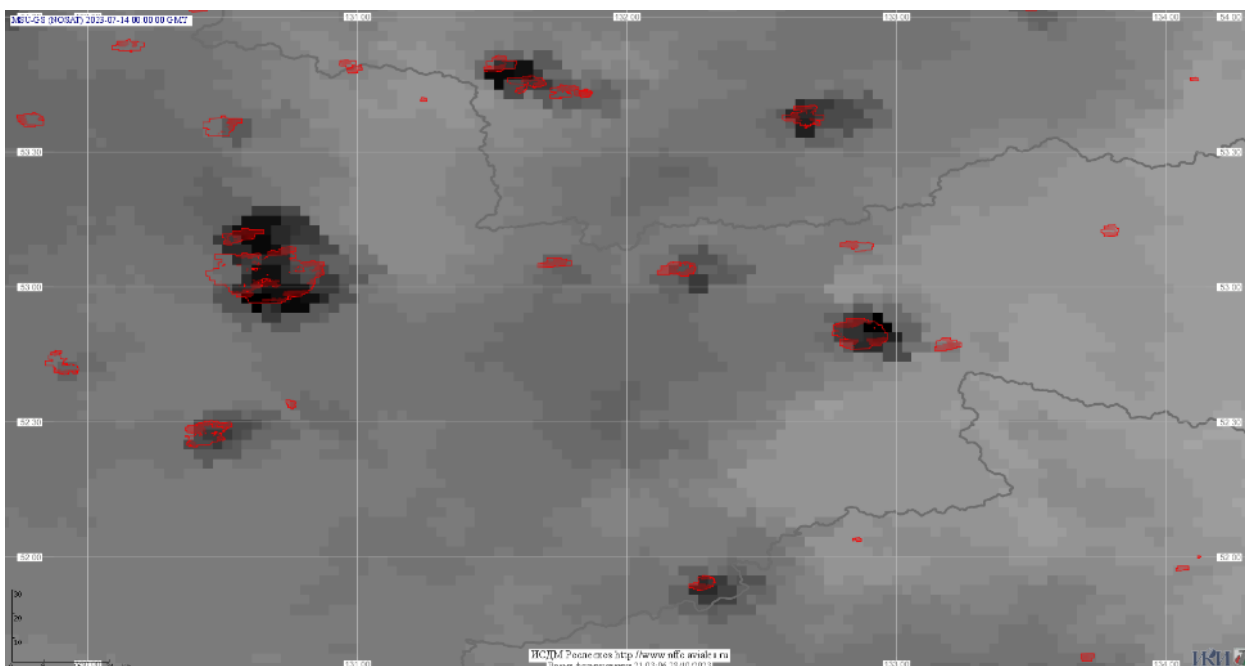


Рисунок.6.2.4.2 — Пример совмещения ежедневной карты максимальных температур, наблюдавшихся в канале 3.5-4 мкм прибора МСУ-ГС/ВЭ 14.07.2023 и данных о детектированных ИСДМ-Рослесхоз участках горения за сутки 14.07.2023



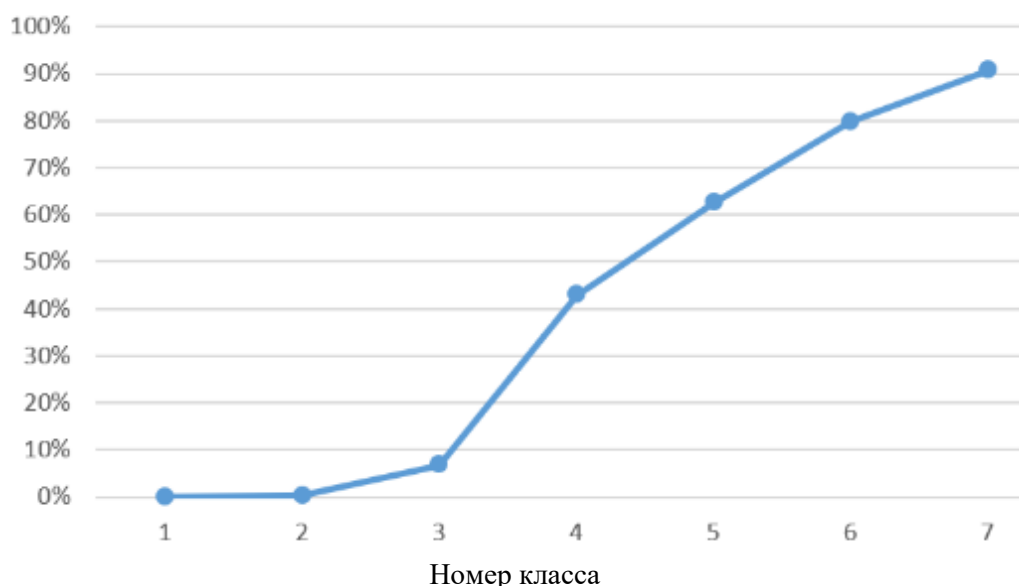


Рисунок 6.2.4.3 — Зависимость вероятности наблюдения очагов горения различной площади по данным прибора МСУ-ГС/ВЭ от площади суточной зоны горения

Как показал проведённый анализ, зоны горения площадью выше 3500 га потенциально могут быть достаточно уверенно (с вероятностью более 80 %) детектироваться на основе информации ВГКС «Арктика-М». В тоже время можно предположить, что создание специальных алгоритмов детектирования горения по данным прибора МСУ-ГС/ВЭ может потенциально позволить повысить вероятность детектирования зон горения и меньшей площади.

Как показывают приведенные результаты исследования, ввиду ограничений на минимальную площадь уверенно детектируемых пожаров, сложно утверждать, что ВГКС «Арктика-М» без разработки специальных подходов к анализу данных может дать преимущества в раннем обнаружении пожаров. В тоже время, дополнительно проведенный анализ ситуаций возникающих пожаров показывает, что в ряде случаев, в силу больших перерывов между пролетами низкорбитальных спутниковых систем, информация ВГКС «Арктика-М» может давать подтверждающую информацию о развитии пожаров и на ранних стадиях. Например, анализ развития пожара к-457 Республика Саха (Якутия), показал, что он обнаружен около 02:00 GMT, после чего он несколько раз наблюдался низкоорбитальными спутниками до 05:00 GMT. Следующее его наблюдение, полученное по данным низкоорбитальных спутников, было только в 16:00 GMT. В тоже время, в районе 10:00 GMT данный пожар начал наблюдаться ВГКС «Арктика-М» № 1 (только в это время спутник включил режим наблюдения) и до 16 GMT получил данные о пожаре 24 раза. Таким образом, на рассматриваемом участке времени вновь возникший пожар наблюдался практически непрерывно. Потенциально на основе подобных серий наблюдений могут, в частности, формироваться информация о характере развития пожара, которая может быть достаточно важна для оперативного принятия решений по оптимальной реакции на его возникновение.

В заключение отметим, что проведенный первичный анализ ВГКС «Арктика-М» на примере данных, полученных спутником «Арктика-М» № 1 в пожароопасном сезоне 2023 г. фактически подтвердил, что достаточно низкое разрешение прибора МСУ-ГС/ВЭ в канале 3,5-4 мкм затрудняет детектирование небольших пожаров. В тоже время, ВГКС «Арктика-М» за счет обеспечения фактически непрерывного наблюдения, безусловно, обладает потенциалом контроля состояния действующих пожаров, в первую очередь — крупных. Поэтому, следует считать целесообразным разработку методов анализа природных пожаров на основе информации, поступающей с данной системы. Видимо, основным направлением развития данных методов должно быть создание подходов,

использующих возможности практически непрерывного наблюдения пожаров для оценки их состояния и оперативного прогнозирования развития. Также, накопленный в рамках проводимой работы опыт работы с данными прибора МСУ-ГС/ВЭ, поступающими в ИСДМ-Рослесхоз, позволяет сделать вывод, что разработка новых подходов анализа данных, особенно основывающихся на многовременных наблюдениях, требует проведения работ по повышению стабильности и точности географической привязки данных.

В целом, проведенный анализ показал, что использование ВГКС «Арктика-М» может обеспечить новые возможности получения информации для мониторинга природных пожаров всей территории Российской Федерации, особенно после того, как группировка спутников будет полностью сформирована.

Данная работа была выполнена совместно с Институтом космических и информационных технологий Сибирского федерального университета и Дальневосточным центром «Планета».

### **6.2.5 Оценка пространственных трендов точности атмосферной коррекции КМСС-2 для территории северной Евразии**

В рамках работ за отчетный период были проведены дальнейшие исследования создаваемых в ИКИ РАН продуктов автоматической обработки уровня L2A на основе данных российских спутниковых систем. В настоящей работе был выполнен комплекс оценок пространственной устойчивости атмосферной коррекции продуктов, получаемых по данным российского прибора КМСС-2 («Метеор-М» № 2-2) для больших неоднородных территорий, характеризующихся сильными различиями климатических условий, а также условий освещения.

В предыдущих работах было продемонстрировано качественное и количественное совпадение атмосферно-скорректированных мультиспектральных измерений КМСС-2 с продуктами соответствующего уровня, полученных по данным MODIS, что позволяет использовать эти данные в ранее разработанных технологических цепочках по распознаванию и оценке состояния растительного покрова, в том числе, с использованием временных серий.

Оценки точности продуктов атмосферной коррекции производились на основе метрик accuracy ( $A$ ), precision ( $P$ ) и uncertainty ( $U$ ), широко используемых для решения задач в этой области. Метрики рассчитываются при сравнении с эталоном, которым в этом случае являлись ежедневные восстановленные изображения MODIS, полученные весовой скользящей интерполяцией LOWESS для территории северной Евразии за 2022 год. Метрики точности рассчитываются следующим образом:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \rho_{\lambda}, \quad P = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta \rho_{\lambda} - A)^2}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta \rho_{\lambda})^2},$$

где  $n$  — число измерений в спектральной страте,  $\lambda$  указывает на спектральный канал (красный либо ближний ИК), а  $\Delta \rho_{\lambda}$  рассчитывается как знаковая разница между измерениями КСЯ КМСС-2 и MODIS в канале  $\lambda$  следующим образом:

$$\Delta \rho_{\lambda} = \rho_{\lambda}^{\text{SR KMSS}} - \rho_{\lambda}^{\text{SR MODIS}}.$$

Необходимо отметить, что алгоритм атмосферной коррекции данных КМСС использует маски облачности и теней для своей работы. Поэтому, на первом этапе, чтобы оценить влияние облачности сцены на точность атмосферной коррекции, была произведена интегральная оценка метрик точности для трёх уровней облачности — 5 %, 20% и 50% (вычисляемых согласно маскам облачности). Исследование велось в предположении, что уровень зашумленности сцены связан с уровнем облачности, т.е., чем выше процент облачности, тем выше ожидаемая ошибка атмосферной коррекции.

Результаты оценки интегральных метрик на всю территорию северной Евразии приведены в таблице 6.2.5.1.

Таблица 6.2.5.1 — Результаты оценки средневзвешенных значений метрик точности при различных уровнях облачности для территории северной Евразии, минимальные между уровнями облачности значения выделены жирным шрифтом

Облачность, %	Средневзвешенное значение		
	Accuracy RED/NIR	Precision RED/NIR	Uncertainty RED/NIR
5	0,0070/0,0044	0,0286/ <b>0,0339</b>	0,0296/ <b>0,0348</b>
20	0,0065/0,0038	0,0287/0,0370	0,0295/0,0379
50	<b>0,0059/0,0034</b>	<b>0,0277/0,0384</b>	<b>0,0285/0,0394</b>

Из таблицы можно сделать вывод, что вариации значений метрики ассигасу для различных уровней облачности довольно малы и никогда не превышают 0,002, а вариации метрик precision и uncertainty не превышают значения 0,005 для любого спектрального канала. Таким образом, был сделан вывод о том, что точность масок мешающих факторов достаточна для корректной работы метода атмосферной коррекции в широком диапазоне климатических условий.

На втором этапе был проведён пространственный анализ устойчивости атмосферной коррекции в терминах метрик оценки точности. Чтобы учесть пространственную вариабельность физико-географических условий и условий освещения для территории северной Евразии, регион был разбит регулярной сетью на участки размером  $2 \times 8^\circ$  ( $2^\circ$  по широте и  $8^\circ$  по долготе) и для каждой ячейки было рассчитано средневзвешенное с учётом числа наблюдений за год значения метрик точности. Результаты приведены на рисунке 6.2.5.1.

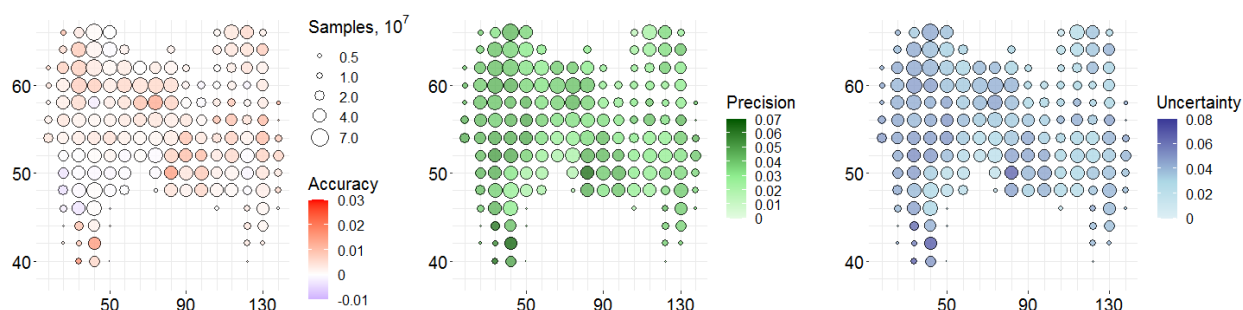


Рисунок 6.2.5.1 — Результаты оценки пространственной вариабельности метрик ассигасу (слева, красные оттенки), precision (в центре, зелёные оттенки), и uncertainty (справа, синие оттенки) для канала NIR и для территории с 40 по 70° с.ш. и с 40 по 160° в.д.; размер выборки, по которой осуществлялась оценка, соответствует схематичному размеру кругов

Полученные карты указывают на максимальные обнаруженные значения метрики ассигасу 0,025, а метрик precision и uncertainty не более 0,06 для канала NIR. С учётом того, что явных пространственных градиентов не было обнаружено, вариабельность метрик, как предполагается, связана с наличием снежного покрова в зимний период, нежели со свойствами растительного покрова. В частности, во время выпадения или таяния снежного покрова, метод атмосферной коррекции работает хуже всего виду того, что снежный покров остаётся на изображениях КМСС, однако на безоблачном эталоне MODIS его нет, что приводит к ухудшению результата совмещения гистограмм. Кроме этого, ухудшение точности совмещения в зимний период может происходить из-за низких углов солнца и заметных изменений условий освещения сцены между пролётами аппаратов Terra/Aqua и «Метеор-М».

Таким образом, отсутствие значимых градиентов и низкие значения метрик качества атмосферной коррекции обеспечивают использование продуктов уровня L2A для решения задач мониторинга растительного покрова на территории северной Евразии. В рамках дальнейших работ предполагается реализовать маскирование снежного покрова на спутниковых изображениях приборов серии КМСС.

## Заключение

В рамках выполнения темы «Мониторинг-Эффект» особое внимание было уделено вопросам построения, управления и калибровки комплексов КМСС на КА серии «Метеор-М», разработке методов обработки данных, ориентированных на использование Российских систем ДЗЗ и вопросам связанных с глобальными процессами.

Подтверждение характеристик целевой аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 было проведено по разработанным методикам в ходе проведения лётных испытаний.

Полётная геометрическая калибровка КМСС-2 была проведена по изображениям береговой линии и островов в Эгейском и Чёрном морях с использованием банка контрольных точек (КТ), созданного по данным Sentinel. На изображениях было распознано приблизительно от трёх до девяти тысяч контрольных точек в зависимости от камеры и спектрального канала, которые могут быть аппроксимированы общей проекционной функцией с остаточным среднеквадратическим отклонением 0,32–0,41 пикселя в направлении полёта и 0,52–0,57 в перпендикулярном направлении ( $1\sigma$ ). Определены основные элементы внутреннего ориентирования спектральных каналов: фокусное расстояние, нормаль к плоскости наблюдения и коэффициенты дисторсии. Результаты калибровки хранятся в файлах геометрической калибровки камер, которые используются для межканального совмещения и географической привязки изображений.

Оценка радиометрических характеристик сенсоров аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 выполнена методом сопоставления коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) КМСС-2 и MODIS/Aqua, вычисленных по изображениям естественных наземных полигонов на территории Гренландии. Отличие коэффициента линейной регрессии от единицы, которое можно рассматривать как оценку расхождения абсолютной калибровки этих сенсоров, составляет по модулю 0,07–1,8 % в зависимости от спектрального канала, а СКО КСЯ не превышает 0,015.

В качестве одного из космических регуляторов климата Земли рассмотрен дисбаланс энергии инсоляции зон полярного дня и энергии излучения зон полярной ночи, влияющий на вековое изменение размеров полярных шапок. Определена зависимость энергетического дисбаланса зон полярных дней и ночей от параметров орбиты Земли: наклона, эксцентриситета, угла прецессии.

Получены алгоритмы определения многовековых колебаний размеров полярных шапок Земли относительно их средних значений, обусловленных дисбалансом энергопотока зон полярных дней и ночей, в зависимости от наклона, эксцентриситета и угла прецессии.

Сделано предположение, что в обозримом будущем изменения параметров орбиты Земли и наклона оси её вращения по отношению к плоскости эклиптики, а также прецессии, на протяжении ближайших трёх тысячелетий будут способствовать медленному таянию северной полярной шапки. Затем снова появится тенденция для нового роста северной полярной шапки. Предполагается также, что в Южном полушарии уже сформировалась тенденция усиления оледенения. Под влиянием космического фактора она будет усиливаться в течение последующих 20 тыс. лет.

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

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

Таким образом, материалы, представленные в данннстоящей главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Эффект» в 2023 г. выполнены в полном объёме.



## РАЗДЕЛ 7 МОНИТОРИНГ-ИНФРАСТРУКТУРА

### Введение

В настоящей главе отчёта представлены основные результаты, полученные в рамках работ по направлению «Мониторинг-Инфраструктура», определённых в плане НИР ИКИ РАН на 2023–2025 гг.

- Ежегодное проведение научной конференции и выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»;
- Проведение научных семинаров и школ-конференций;
- Подготовка и повышение квалификации кадров на базе НОЦ ИКИ РАН.

Настоящий раздел посвящён описанию основных результатов, полученных при выполнении данных работ. Полученные в рамках работ 2023 г. результаты также изложены в следующих публикациях [10–12, 20, 89, 93].

### 7.1 Проведение ежегодной международной конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://conf.rse.geosmis.ru/>)

С 13 по 17 ноября 2023 г. в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) была проведена Двадцать первая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://conf.rse.geosmis.ru/>). Эта традиционная ежегодная конференция является самой крупной в России, ориентированной на специалистов в области использования данных дистанционного зондирования для решения научных и прикладных задач. В 2023 г. на конференции было представлено 519 докладов. В конференции принимали участие ученые и специалисты из 18 стран, 88 городов и 214 организаций.

Работа конференции осуществлялась в рамках следующих секций и заседаний:

- Два пленарных заседания;
- методы и алгоритмы обработки спутниковых данных;
- технологии и методы использования спутниковых данных в системах мониторинга;
- дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов;
- дистанционные исследования водных объектов;
- дистанционное зондирование криосферных образований;
- дистанционное зондирование ионосферы;
- дистанционные методы в геологии и геофизике;
- дистанционное зондирование растительных и почвенных покровов;
- дистанционное зондирование планет Солнечной системы.
- дистанционный мониторинг крупномасштабных климатических изменений и климатически активных газов — совместное заседание конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» и «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества»
- выездное заседание конференции в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы». Тема заседания «Вопросы управления и применения космических систем ДЗЗ. Целевая и служебная аппаратура». Секция проводилась в виде телемоста между ИКИ РАН и НЦ ОМЗ.

Первое пленарное заседание было посвящено в основном перспективам развития российских орбитальных группировок. В рамках первого пленарного заседания были представлены следующие доклады:

**Хайлов М.Н., Заичко В.А.** (Госкорпорация «Роскосмос», Москва)

«О направлении работ Госкорпорации „Роскосмос“ по решению проблемных вопросов ДЗЗ из космоса в условиях цифровой трансформации»

**Асмус В.В. (1), Тасенко С.В. (1), Хайлов М.Н. (2), Шумаков И.А. (3)** (1 — Европейский центр «НИЦ «Планета»; 2 — Госкорпорация «Роскосмос»; 3 — Росгидромет РФ, Москва)

«Национальная спутниковая группировка для обеспечения решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды»

**Хартов В.В., Твердохлебова Е.М.** (Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев)

«Создание российской многоспутниковой орбитальной группировки ДЗЗ»

**Емельянов А.А.** (АО «Российские космические системы», Москва)

«Многоспутниковые орбитальные группировки: подходы к управлению и применению»

**Рукавишникова Е.Л.** (Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королёв)

«Система глобального мониторинга Земли «Грифон»

**Копик А.Г.** (АО Ситроникс, Москва)

«Многоспутниковые группировки малых космических аппаратов»

**Ткаченко И. С.** (Самарский университет им. С.П. Королёва, Самара)

Унифицированная маломасштабная космическая платформа «Аист-2»: результаты функционирования аппарата «Аист-2Д» для решения тематических задач зондирования Земли и перспективы развития проекта

Второе пленарное заседание было посвящено научным мероприятиям, которые связаны с работами в области ДЗЗ (конференции, крупные семинары, образование, журналы). В рамках второго пленарного заседания были представлены следующие доклады:

**Емельянов А.А., Селин В.А.** (АО «Российские космические системы», Москва)

«Публичная деятельность АО «Российские космические системы» в области ДЗЗ»

**Пестунов И.А.** (Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск)

«Развитие методов и технологий обработки пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (по материалам конференции SDM-2023)»

**Брежнев Р.В., Маглинец Ю.А., Мерко И.С., Раевич К.В., Цибульский Г.М.** (Сибирский федеральный университет, Красноярск)

«Десять лет конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», г. Красноярск»

**Воронин Е.Г.** (Научно-производственный центр «ОПТЭК» Акционерного общества «Российские космические системы», Москва, Зеленоград)

«О конференции „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“»

**Митник Л.М., Митник Л.М.** (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток)

«Научная сессия в ТОИ ДВО РАН: „Дистанционные исследования океана, ледяного покрова и атмосферы“. 66 лет космической эры»

**Ермаков Д.М., Лупян Е.А.** (Институт космических исследований РАН, Москва)

«Всероссийский семинар „Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса“»

**Сазонов В.В.** (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва)

«Опыт подготовки студентов на Факультете космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова в направлении дистанционного зондирования Земли и планет»

**Луян Е.А., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю.** (Институт космических исследований РАН, Москва) «Двадцать лет журналу „Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса“»

В рамках конференции совместно с Российским центром государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения (ФГБУН «Россельхозземмониторинг») был проведён круглый стол «Технологии дистанционного зондирования Земли из космоса в интересах госпрограммы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации», одним из основных вопросов, обсуждаемых на круглом столе, был вопрос использования возможностей ДЗЗ для установления границ земель сельскохозяйственного назначения. В круглом столе приняли участие более 100 специалистов, в том числе специалисты Государственного университета по землеустройству, Почвенного института им. В.В. Докучаева, других научных институтов, региональных министерств сельского хозяйства и коммерческих организаций, выполняющих работы в данном направлении. Информацию о программе круглого стола, включая доступную для просмотра его запись, можно получить по адресу (<http://conf.rse.geosmis.ru/schedule.aspx?page=280>), число просмотров которой на середину декабря превысило 600.

Также были организованы два мастер-класса: на тему «Практический опыт применения технологий спутникового мониторинга земель сельскохозяйственного назначения при решении региональных задач АПК в среде аграрных вузов», который провели сотрудники ИКИ РАН и Пензенского государственного аграрного университета; и на тему «WEB- и ГИС-системы разработки НИЦ „Планета“ для решения метеорологических задач», который провели сотрудники Дальневосточного центра ФГБУ «НИЦ «Планета».

Конференция проводилась в смешанном формате (очном и онлайн). Все мероприятия конференции транслировались на платформах Zoom и YouTube. Такой формат позволил принять участие в конференции более 1100 специалистам. Большой интерес к конференции также демонстрирует общее число просмотров записи трансляций её заседаний. Так на середину декабря 2023 г. их насчитывалось около девяти тысяч. При этом трансляции посмотрело более 3500 уникальных зрителей. Информацию о программе прошедшей конференции, включая информацию о доступных для просмотра его записей, её заседаниях и мероприятиях можно получить по адресу: <http://conf.rse.geosmis.ru/schedule.aspx?page=251>.

По результатам конференции и школы-конференции был подготовлен электронный сборник материалов (<http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2023/index.htm>), который публикуется также на сайте научной электронной библиотеки Elibrary и индексируется в системе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования). Также на сайте конференции можно получить доступ к трансляциям всех мероприятий, воспользовавшись разделом «Электронная программа» (<http://conf.rse.geosmis.ru/schedule.aspx?page=251>).

## **7.2 Проведение научных семинаров и школ-конференций по фундаментальным проблемам ДЗЗ из космоса**

### ***7.2.1 Проведение ежегодной международной научной школы-конференции молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса (<http://conf.rse.geosmis.ru/>)***

В рамках Двадцать первой международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 13–17 ноября 2023 г. в ИКИ РАН

проходила Девятнадцатая международная научная школа-конференция молодых учёных по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса. Во время проведения Школы-конференции были прочитаны лекции ведущими российскими и зарубежными учёными из Беларуси, Бразилии, Индии, Казахстана и Китая. Со списком лекций прочитанных в рамках Школы-конференции ознакомиться по адресу:

Информацию о программе школы-конференции, включая доступную для просмотра его запись, можно получить по адресу: <http://conf.rse.geosmis.ru/schedule.aspx?page=281>

Лекции транслировались также в online режиме.

Молодые учёные представили 54 устных и 23 стендовых докладов. По результатам конкурса его призёрам были присуждены девять премий трёх различных уровней и тринадцать поощрительных грамот.

Подробную информацию о работах молодых учёных, удостоенных премиями и почётными грамотами, можно получить на сайте конференции в разделе электронного сборника материалов 21-й конференции.

### **7.2.2 Проведение Всероссийского семинара «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=814>)**

Всероссийский семинар «Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» основан в 2021 г. Семинар проходит в смешанном очном и дистанционном формате. По замыслу организаторов, такой семинар в перспективе должен стать хорошим дополнением к уже проходящим в нашей стране регулярным конференциям, посвященным дистанционному зондированию Земли и, в частности, ежегодным Международным конференциям «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Он позволит иметь постоянно действующую площадку для обсуждения различных вопросов, связанных с проблемами дистанционного зондирования Земли из космоса, способствовать формированию актуальной повестки очередных конференций и, в то же время, предоставит возможность широкомасштабной дискуссии по уже поставленным проблемам и задачам. В отличие от формы обсуждения докладов на различных конференциях, когда докладчик и слушатели обычно ограничены жёстким регламентом, семинар позволяет снять такие ограничения и детально обсудить затронутую тему. При этом докладчик, фактически, не ограничен во времени выступления и ответов на вопросы. Предоставление широкому кругу пользователей распределённого доступа к записям прошедших семинаров и возможности их обсуждения, также позволят расширить аудиторию, участвующую в анализе поставленной проблемы.

Заседания семинара традиционно начинаются в 11:00 по московскому времени для удобства участников из всех часовых поясов России. Кроме того, презентации выполненных докладов и видеозаписи трансляций сохраняются в открытом доступе на странице семинара (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=817>). Отдельная страница посвящена анонсу очередных заседаний (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=816>) и обновляется по мере формирования рабочей повестки. В настоящее время анонсы о очередном заседании семинара направляются широкому кругу специалистов, в том числе тем, кто зарегистрирован на сайте конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса».

С основания семинара осенью 2021 г. было проведено в совокупности 11 заседаний (по три в 2021 и 2022 гг. и пять — в 2023 г.). В заседаниях, как правило, принимают участие от 50 до 100 специалистов по обсуждаемой тематике. Востребованной оказывается и возможность просмотра заседаний в видеозаписи. Так, число просмотров только первых двух заседаний 2021 г. составило около 2000. Аудиторию Семинара отличает широкий географический охват: обычно представлены многие регионы России и страны ближнего зарубежья. В последнее время интерес к семинару проявляют представители КНР. Наиболее активно в семинаре участвуют представители

академических организаций (Института космических исследований РАН, Института физики атмосферы РАН, Института водных и экологических проблем Сибирского Отделения РАН), структур Роскосмоса и Росгидромета, образовательных учреждений (Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Казанского федерального университета, Пермского государственного национального исследовательского университета и др.).

В 2023 г. было проведено пять заседаний, на которых были представлены следующие доклады:

– *Некоторые аспекты дистанционного микроволнового мониторинга засух на юге Западной Сибири* (А.Н. Романов, д-р техн. наук, зав. лаб. физики атмосферно-гидросферных процессов ИВЭП СО РАН). Данные спутников SMOS и MODIS, совместно с полевыми и лабораторными измерениями характеристик проб почвы использовали для разработки «дистанционного микроволнового индекса засухи» (Remote Microwave Soil Drought Index — RMSDI). На основе разработанной методики построены карты-схемы RMSDI и объемной влажности почвы,  $W$ , на территорию Кулундинской равнины Алтайского края (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=956>).

– *Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования* (О.Ю. Лаврова, канд. физ.-мат. наук, доцент, в.н.с., зав. лаб. «Аэрокосмической радиолокации» отдела «Исследования Земли из космоса» ИКИ РАН). Доклад был посвящен результатам исследования изменения экологического состояния Каспийского моря на протяжении текущего столетия под воздействием природных и антропогенных факторов. В исследовании был осуществлён комплексный подход, объединяющий анализ архивных спутниковых данных за 1999-2018 годы и данных оперативного спутникового мониторинга, проводимого в период исследований 2019-2022 годов. Анализ многосенсорных и мультиплатформных радиолокационных, оптических и ИК спутниковых данных был сопряжён с анализом гидрометеорологических и климатических данных для выявления многообразных причинно-следственных связей в межгодовой изменчивости экологического состояния Каспийского моря (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=958>).

– *Спутниковый мониторинг состояния аридных ландшафтов России и сопредельных территорий* (С.С. Шинкаренко, к.с.-х.н., с.н.с. отдела технологий спутникового мониторинга ИКИ РАН). В докладе были отражены результаты исследований динамики состояния ландшафтов в зоне опустыненных степей и северных пустынь России и сопредельных территорий Западного Казахстана под влиянием природных и антропогенных факторов. В основу проведённых исследований было заложено комплексное использование спутниковых данных различного пространственного и временного разрешения, информационных продуктов тематической обработки данных ДЗЗ, наземных измерений и наблюдений, климатических и статистических данных. Анализ всей совокупности использованной информации позволил выявить закономерности динамики состояния и пожарного режима исследованных ландшафтов (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=959>).

– *Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения: анализ по многолетним рядам спутниковых данных* (А.Н. Шихов, д.г.н., доцент кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного университета). В докладе были обобщены результаты исследований ветровалов в лесной зоне Европейской территории России и Сибири, произошедших за последние 40 лет и условий их возникновения. Были представлены авторская методика сбора и систематизации данных о ветровалах по спутниковым снимкам, созданные картографические базы данных для лесной зоны исследованных территорий; обсуждены закономерности, определяющие подверженность лесов ветровалам, описаны метеорологические явления, вызывающие



ветровалы, и особенности их возникновения (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=963>).

– *Пассивное зондирование Луны с использованием данных микроволнового радиометра миссий «Чанъэ-1/2» и его геологическая значимость* (Zh. Meng, Ph. Doctor, Professor of the College of Geoporation Science and Technology, Jilin University, КНР). Были представлены результаты многоканальных измерений микроволновым радиометром (MRM) спутников «Чанъэ 1/2» яркостных температур всей Лунной поверхности, а также их интерпретация на основе радиофизического моделирования. В частности, освещены следующие три аспекта исследований: 1) сравнение поведения яркостных температур в основных базальтовых отложениях с данными оптических и радиолокационных позволило предположить, что данные MRM могут выявлять базальтовые отложения различных геологических эр; 2) были выявлены горячие аномалии в микроволновом диапазоне, которые могут указывать на аномально высокие тепловые потоки и даже аномально нагретое состояние современной лунной коры; 3) были выявлены холодные аномалии в микроволновом диапазоне, которые могут указывать на выход горных пород и/или особенности минерального состава. Дальнейшему прогрессу в интерпретации данных измерений, по мнению докладчика, будет способствовать тесное международное сотрудничество, в том числе, со специалистами ИКИ РАН (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=964>).

По мнению организаторов, формат Семинара является хорошим и важным дополнением к уже проходящим в нашей стране регулярным конференциям, посвящённым дистанционному зондированию Земли. Организаторы семинара надеются, что по мере его развития удастся обеспечивать частоту его проведения примерно раз в месяц. В перспективе также планируется дальнейшее расширение тематики семинара, в том числе за счет включения в обсуждение вопросов разработки и создания новой аппаратуры спутникового мониторинга, обсуждением комплексных задач ДЗЗ, требующих кооперации специалистов из различных предметных областей.

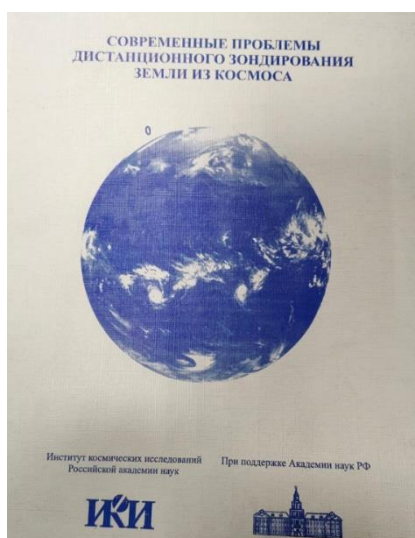
### **7.3 Выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://jr.rse.cosmos.ru/>)**

В 2022 году вышел 20-й том журнала, включающий 6 номеров, в составе которых были подготовлены 151 публикация более 300 авторов из более, чем 100 организаций. Таким образом, завершён двадцатилетний цикл развития журнала. Поэтому в настоящем разделе отчета представлена краткая информация о истории создания и развитии журнала, а также о его текущем статусе, состоянии и возможных перспективах.

Первый том (выпуск) журнала был подготовлен по результатам первой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», которая прошла в Институте космических исследований Российской академии наук в ноябре 2003 года. Выпуск вышел в 2004 году. В выпуске был 1 номер, в который вошло 58 статей 147 авторов из 45 организаций. Выпуск вышел под редакцией член.-корреспондента РАН Г.М. Чернявского. В дальнейшем долгое время главным редактором журнала был академик Н.П. Лаверов.

За двадцать лет журнал прошел достаточно большой путь и претерпел достаточно серьезные изменения, связанные как с накоплением опыта подготовки и его издания, так и со стремительным развитием областей, связанных с дистанционными исследованиями Земли, которым посвящен журнал. Изменился как вид журнала (см. рисунок 7.3.1), так и форма его представления. Если в 2004 году основным видом распространения журнала было его «бумажное» издание, то в настоящее время это полноценное электронное издание, которое обеспечивает возможность распределенного доступа ко всем опубликованным в нем материалам (на момент выхода данного краткого сообщения это 90 номеров, включающих 2726 статей). Особо подчеркнем, что благодаря поддержке

издателя (ИКИ РАН) и Минобрнауки, журнал распространяется свободно и не требует оплаты за доступ к опубликованным в нем научным статьям.



а)



б)

Рисунок 7.3.1 – Внешний вид печатной версии журнала в 2004 (а) и в 2023 году (б).

В настоящее время журнал входит в список ВАК, индексируется в РИНЦ, SCOPUS (с 2015 года), Web of Science (Russian Science Citation Index) и Science Index. На момент подготовки работы к печати журнал имел следующие основные показатели:

– Суммарное число цитирований статей журнала в РИНЦ	<b>19 653</b>
– Показатель журнала в рейтинге SCIENCE INDEX (за 2022 г.)	<b>9,653</b>
– Место в общем рейтинге SCIENCE INDEX (за 2022 г.)	<b>70</b>
– Перцентиль в рейтинге SCIENCE INDEX (за 2022 г.)	<b>2</b>
– Место в рейтинге SCIENCE INDEX (за 2022 г.) по тематике «Космические исследования»	<b>1</b>
– Число авторов, статьи которых опубликованы в журнале	<b>более 2000</b>

Подробно с актуальными показателями журнала можно познакомиться по адресу: [https://www.elibrary.ru/title\\_profile.asp?id=28180](https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=28180)

В целом в последние годы журнал демонстрирует положительную динамику как по импакт фактору (см. рисунок 7.3.2), так и по рейтингу (месту данного показателя) среди журналов близкой тематики (см. рисунок 7.3.3). Отметим, что к представленной на этих рисунках информации за 2022 следует относиться как к предварительной, поскольку обычно показатели цитирования статей достаточно активно растут в течение нескольких лет после их публикации. В то же время нельзя не отметить, что для многих журналов, индексируемых различными зарубежными системами, в том числе и для журнала "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", наблюдались некоторые проблемы с индексированием. Например, часть работ журналов могла быть непроиндексирована зарубежными системами. Это, в том числе, могло привести и к общему сокращению цитирований российских журналов и, как следствие, к падению импакт-факторов этих журналов.



Рисунок 7.3.2 – Изменения двухлетнего импакт-фактора журнала за период с 2008 по 2023 годы

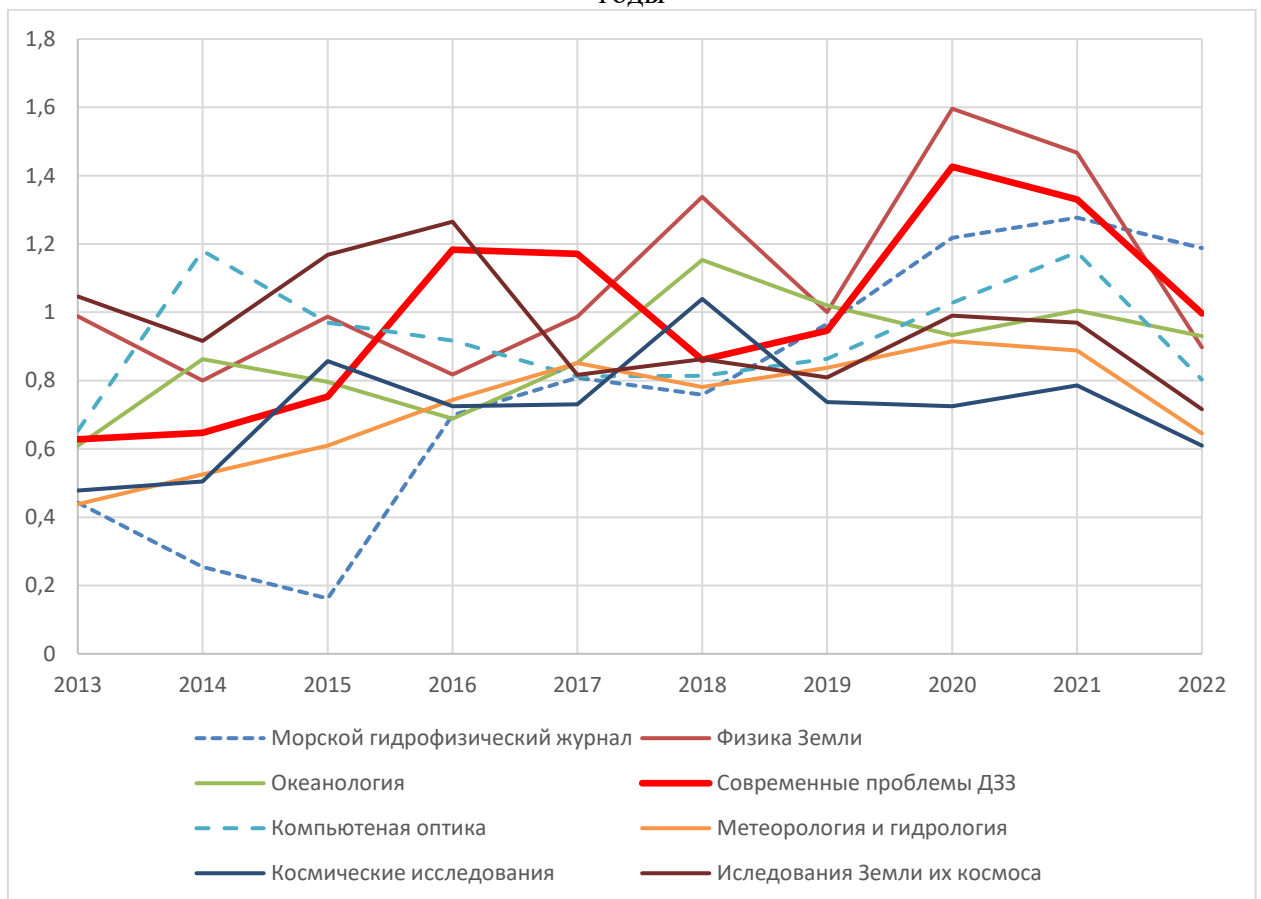


Рисунок 7.3.3 – Изменения двухлетних импакт-факторов журналов, близких по тематике журналу «Современные проблемы исследований Земли из космоса» за период с 2008 по 2023 годы.

Также обратим внимание, что одной из важных особенностей журнала является то, что в журнале фактически нет сотрудников, для которых работа по выпуску журнала являлась бы основной. В то же время, журналу удается осуществлять сбор, рецензирование и публикацию достаточно большого числа статей. В последние годы в журнале публикуется порядка 160 статей в год. В номерах, которые выходят раз в два месяца, публикуется от 20 до 30 статей. С учетом статей, которые отклоняются после прохождения рецензирования, через журнал проходит около 200 статей в год. При этом средний цикл публикации работы (от поступления в журнал до выхода статьи) в последние годы составляет около 4-5 месяцев. Добиться такой «продуктивности» журналу помогают достаточно активно работающие рецензенты, состав которых постоянно расширялся по мере развития журнала, а также высокий уровень автоматизации всех процессов рецензирования и издания журнала. Журнал уже много лет назад фактически полностью отказался от бумажного оборота в процессах приема, рецензирования, подготовки и издания статей (исключая формальные вопросы сбора экспертных заключений). Это позволило сделать в интересах журнала специалистами ИКИ РАН и компанией TXL (<https://www.txl.ru/>) специализированную информационную систему, которая обеспечивает возможность подачи статей on-line, отправку редактором статей на рецензирование и контроль всего жизненного цикла поданной статьи, получение статей рецензентами и отправку ими рецензий в журнал, ознакомление авторов с отзывами и, при необходимости, внесение исправлений, формирование номеров для издания и их публикацию на сайте журнала и т.д. Работа с системой осуществляется распределено через сайт журнала <http://jr.rse.cosmos.ru/>.

Также отметим, что редакция журнала старается постоянно совершенствовать как технические возможности журнала, так и организационные схемы его работы, и расширять возможности журнала. Например, с 2022 года при поддержке учредителя журнала и журнала «Космические исследования» начаты выборочный перевод и публикация статей журнала в специализированных выпусках журнала «Cosmic Research». Первые спецвыпуски фактически были опубликованы в 2023 году.

В целом редакция журнала старается совершенствовать процессы публикации для того, чтобы повысить качество публикуемых материалов и оперативность публикации. На сегодняшний день мы считаем, что одним из ключевых вопросов при решении этих задач является привлечение высококвалифицированных рецензентов. В том числе для решения данной задачи в последние годы для авторов журнала была реализована возможность рекомендации кандидатов в рецензенты.

## **7.4 Подготовка и повышение квалификации кадров на базе НОЦ ИКИ РАН**

### ***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»***

В 2023 г. проводилось два Дня открытых дверей (15 апреля, в честь Дня космонавтики и 25 ноября, как заключительная часть конференции «Наука на МКС»). Количество посетителей весной было в районе 200 человек, осенью — более 400.

Кроме того, проводилась работа со школьниками в виде чтения научно-популярных лекций и проведения консультаций, рецензирования научных работ школьников. Представители ИКИ РАН участвовали в качестве экспертов в конкурсе школьных работы «Шаг в будущее» и на городской конференции «Наука для жизни».

В рамках программы «Академический класс в московской школе» (<http://docs.cntd.ru/document/456037056>) были проведены семинары для учителей, в том числе по работе с данными ДЗЗ.

#### **7.4.2 Кафедра «Технологий дистанционного зондирования» Факультета космических исследований МГУ им М.В. Ломоносова**

Продолжается работа кафедры в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова (МГУ) на Факультете космических исследований (<http://cosmos.msu.ru/>).

Одна из программ: Методы и технологии дистанционного зондирования Земли (научный руководитель: зам. директора ИКИ РАН, доктор технических наук Лупян Евгений Аркадьевич). В рамках программы в магистратуре обучается более 20 магистрантов.

Задачи программы «Методы и технологии дистанционного зондирования Земли» формировались с учётом того, что перед факультетом стоят задачи подготовки специалистов для проведения научных исследований 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 обучения студенты принимают участие в научных исследованиях.

#### **7.4.3 Научно-образовательные конференции**

Ежегодно организуются конференции по вопросам исследования и использования космического пространства.

В 2023 г. были проведены следующие мероприятия:

- XX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики. В конференции принимали участие молодые ученые и аспиранты ИКИ РАН, базовых кафедр МФТИ, МГУ имени М.В. Ломоносова, МГПУ им. Ленина, ГЕОХИ, МИФИ, ВШЭ, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Участвовали молодые сотрудники ГАИШ, ЛГУ, ГЕОХИ, предприятий Роскосмоса. По результатам конференции издан сборник трудов.

#### **Заключение**

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

- Ежегодное проведение научной конференции и выпуск журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»;
- Проведение научных семинаров и школ-конференций;
- Подготовка и повышение квалификации кадров на базе НОЦ ИКИ РАН.

Таким образом, материалы, представленные в данной главе, позволяют считать, что работы по направлению «Мониторинг-Инфраструктура» в 2023 г. выполнены в полном объёме.



## РАЗДЕЛ 8 НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИКИ РАН

### 8.1 Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа спутниковых данных об интенсивности горения

В работе представлены результаты оценки гибели лесов от пожаров на северных территориях в XXI в. на основе анализа данных об интенсивности горения по спутниковым данным. Оценки проведены с использованием созданных в ИКИ РАН методов и более чем 20-летних архивов данных о повреждениях лесов пожарами. В работе представлен анализ распределений площади пожаров и погибших от их воздействия лесов по различным годам и странам, а также в следующих зонах:

- зона, расположенная севернее 60° с.ш. («Зона 60»)
- зона, расположенная севернее Полярного круга («Зона ПК»).

Представленные в работе данные позволили сделать предварительный вывод о том, что в последние два десятилетия значимых изменений в числе пожаров в «Зоне 60» не наблюдалось. В тоже время необходимо отметить, что в «Зоне ПК» в 2019–2020 гг. произошёл резкий рост числа пожаров на территории России. В тоже время в исследуемый период не наблюдается трендов изменения доли площади погибших лесов от общей их площади в странах с наличием территорий в анализируемых зонах. Средняя доля ежегодно погибающих лесов от пожаров лесов по отношению к общей площади последних в стране за последнее десятилетие сопоставима в России, США и Канаде и существенно ниже в странах северной Европы. В тоже время, в среднем за весь анализируемый период доли площади погибших лесов по отношению к пройденной огнём площади леса в Канаде и США почти в 1,5 раза выше, чем в России и почти в 3 раза выше, чем в Европе. Это отчасти может быть связано с различным уровнем охраны лесов от пожаров в разных странах.

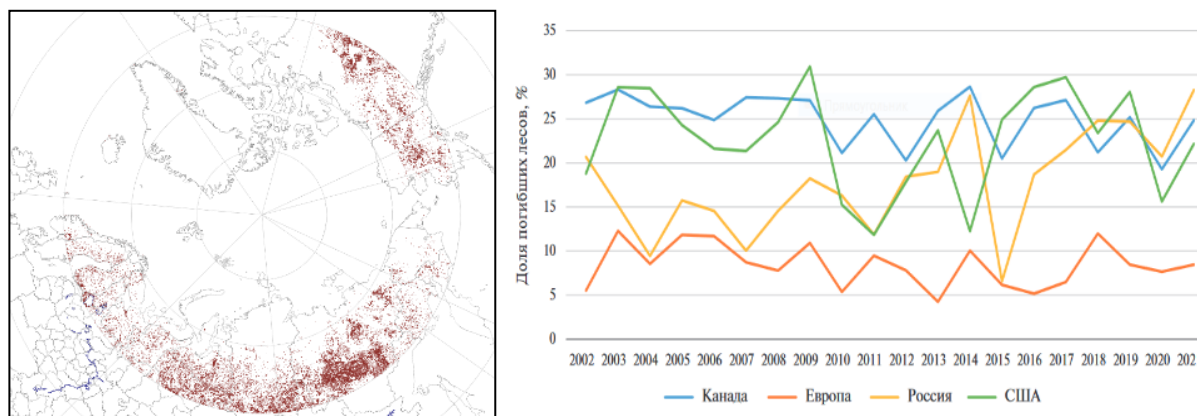


Рисунок 8.1.1 — Повреждённые пожарами территории северных лесов (севернее 60° с.ш.) в период с 2012 по 2021 годы (слева) и доля погибших лесов по отношению к пройденным огнём площади в разрезе различных стран (справа)

1. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 292–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301.

(Lozin D.V., Loupian E.A., Balashov I.V., Bartalev S.A. Estimation of Northern Burnt Forest Mortality in the 21st Century Based on MODIS Data on Fire Intensity // Cosmic Research. 2023. V. 61. Suppl. 1. P. S118–S124.)

## РАЗДЕЛ 10 ГРАНТЫ ПО НАПРАВЛЕНИЮ МОНИТОРИНГ

### Российский научный фонд (РНФ)

23-27-00412 Развитие методов дистанционной оценки биофизических характеристик растительного покрова на основе российских спутниковых данных КМСС, модели переноса излучения и методов машинного обучения	Плотников Д.Е. канд. физ.-мат. наук	2023 – 2024
РНФ 21-77-00018 Закономерности динамики состояния ландшафтов речных пойм зоны недостаточного увлажнения в условиях гидрологических и климатических изменений	Шинкаренко С.С., к.с.-х.н.	2021–2023
№ 23-77-00027 Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования	Костяной А.Г. д-р физ.-мат. наук Лаврова О.Ю. канд. физ.-мат. наук	2023–2026
№ 23-27-00124 Современные алгоритмы расчета концентрации взвешенного вещества и мутности в приустьевых зонах морей по оптическим спутниковым данным высокого пространственного разрешения: анализ и верификация	Назирова К.Р.	2023–2024
№ 23-17-00161 Анализ ледовых условий плавания и элементов динамики ледяного покрова в районе Северного морского пути как основа качественных долгосрочных прогнозов	Алексеева Т.А.	2023–2025

### Минобрнауки России

№ ЭБ 075-15-2022-1229, Применение технологий высокопроизводительных вычислений и больших данных для совместной разработки экономически эффективных автоматизированных методов широкомасштабного биомониторинга водно-болотных угодий	Барталев С.А., д-р техн. наук	2022
---	----------------------------------	------

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что по результатам работ по направлению темы «Мониторинг» сотрудниками ИКИ РАН опубликовано — 138 работ, из них опубликовано:

- в зарубежных изданиях — 7;
- книг — 2;
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах — 43;
- статьи в сборниках материалов конференций — 5;
- материалы конференций — 56;
- тезисы, доклады — 24;
- патенты — 1.

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 130 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.
- 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 Vega-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/>).
- Действующего прототипа центрального информационного узла ИАС «Углерод-Э» (<http://carbon.geosmis.ru/>), созданного в рамках выполнения важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ), посвященного созданию национальной системы мониторинга климатически активных газов;
- профессионального информационного сервиса анализа данных спутниковых наблюдений для оценки и мониторинга возобновляемых биологических ресурсов ВЕГА-PRO (<http://pro-vega.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 — 159 работ, из них:

- в зарубежных изданиях — 7;
- книг — 2;
- статьи в отечественных научных рецензируемых журналах — 43;
- статьи в сборниках материалов конференций — 5;
- материалы конференций — 56;
- тезисы, доклады — 24;
- патенты — 1;
- публикаций по грантам РФФИ — 18;
- в соавторстве с зарубежными авторами — 3;
- статьи в WOS и Scopus — 45 (из них в печати — 9);
- статьи в WOS и Scopus (Q1, Q2) — 4;
- статьи в WOS и Scopus (Q3, Q4) — 41

### Публикации в зарубежных изданиях

1. Wu B., Zhang M., Zeng H., Tian F., Potgieter A.B., Yan N., Chang S., Zhao Y., Dong Q., Boken V., Plotnikov D.E., Guo H., Wu F., Zhao H., Deronde B., Tits L., Loupian E.A. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review // National Science Review. 2023. nwac290. DOI: doi.org/10.1093/nsr/nwac290. (**Web of Science, Scopus Q1**)
2. Girina O.A., Manevich A.G., Loupian E.A., Uvarov I.A., Korolev S.P., Sorokin A.A., Romanova I.M., Kramareva L.S., Burtsev M.A. Monitoring the Thermal Activity of Kamchatkan Volcanoes during 2015–2022 Using Remote Sensing // Remote Sensing. 2023. V. 15. Iss. 19. DOI: 10.3390/rs15194775. (**Web of Science, Scopus Q1, РИНЦ**)
3. Alekseeva T.A., May R.I., Fedyakov V.Ye., Makarov Y.I., Klyachkin S.V., Dymant L.N., Grishin Y.A., Ershova A.A., Krupina N.A. Ice Automatic Routing: Analysis of Simulation Testing Based on Voyages of Arc7 Class Vessels in the Arctic // Intern. J. Offshore and Polar Engineering. 2023. V. 33. No. 3. P. 234–241. <https://doi.org/10.17736/ijope.2023.ik12>. (**Web of Science Q4, Scopus Q3, РИНЦ**)
4. Arumov G.P., Bukharin A.V. Opticophysical Measurements. Comparison of Methods of Determining Particle Concentrations in a Model Scattering Layer for an Elastic Scattering Lidar // Measurement Techniques. 2023. V. 66. No. 4. P. 252–258. DOI: 10.1007/s11018-023-02218-5. (**Web of Science, Scopus Q4, RSCI, РИНЦ**)
5. Arumov G.P., Bukharin A.V. Selection of the optimal paths for remote measurements of the microstructure of a scattering object // Measurement Techniques. 2023. V. 65. No. 10. P. 734–741. DOI: 10.1007/s11018-023-02146-4. (**Web of Science, Scopus Q4 RSCI, РИНЦ**)
6. Gusev A., Martin I., Alves M. On the Possibility of the use of Tube Counters in Neutron Spectrometry // SSRG Intern. J. Applied Physics. 2023. V. 10. No. 1. P. 18–21. DOI: 10.14445/23500301/IJAP-V10I1P103.
7. Levina G.V. Helical cyclogenesis as an extreme threshold phenomenon in a rotating stratified moist atmosphere // Frontiers in Earth Science. 2023. V. 11. Article 1296067. DOI: 10.3389/feart.2023.1296067/ (**Web of Sciences-Q2; Scopus-Q1**)

## Книги

8. Федоринов А.В., Волков С.Н., Денисов П.В., Козубенко И.С., Комаров С.И., Кононов В.М., Лепехин П.П., Лупян Е.А., Петрова Л.Е., Сорокина О.А., Трошко К.А., Холодов Д.В., Черкашина Е.В., Шаповалов Д.А., Антропов Д.В. Установление границ земель сельскохозяйственного назначения (опыт пилотных регионов): монография / общая ред. Федоринова А.В. М.: РАДУГА, 2023. 420 с. ISBN 978-5-9215-0592-6. (РИНЦ)
9. Барталев С.А., Бурнаев Е.В., Верба В.С., Ивлиев Н.А., Казанский Н.Л., Каперко А.Ф., Лупян Е.А., Никоноров А.В., Скиданов Р.В., Черниенко А.А. Мультиспектральный интеллектуальный мониторинг природной и техногенной среды: монография / под ред. акад, РАН В.Я. Панченко. Самара: Новая техника, 2023. 184 с. ISBN 978-5-88940-164-33.

## Публикации в отечественных научных рецензируемых изданиях

10. Ермаков Д.М., Лупян Е.А. Всероссийский семинар «Проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. (Scopus Q3, РИНЦ) (в печати)
11. Лупян Е.А., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю. Двадцать лет журналу «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. (Scopus Q3, РИНЦ) (в печати)
12. Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А., Кобец Д.А. Двадцать первая международная конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. (Scopus Q3, РИНЦ) (в печати)
13. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития сельскохозяйственных культур в России в 2023 году по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. (Scopus Q3, РИНЦ) (в печати)
14. Ведешин Л.А., Шаповалов Д.А., Евстратова Л.Г. Первые российские научные эксперименты по изучению природной среды с помощью беспилотных летательных аппаратов // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. (Scopus Q3, РИНЦ) (в печати)
15. Кашиницкий А.В., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Анализ возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга объектов // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 60-74. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-60-74. (Scopus Q3, РИНЦ)
16. Златопольский А.А., Шекман Е.А. Порядковая и масштабная статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 125–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-125-134. (Scopus Q3, РИНЦ)
17. Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурдаев А.А., Бриль А.А., Озеров А.Ю., Крамарева Л.С., Сорокин А.А. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291. (Scopus Q3, РИНЦ)
18. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балаиов И.В., Барталев С.А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности



- горения // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 292–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
19. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития озимых сельскохозяйственных культур в южных и центральных регионах России весной 2023 года по данным дистанц. мониторинга // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 302–308. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-302-308. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
20. Ведешин Л.А. Международное сотрудничество в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях (К 55-летию программы «Интеркосмос») // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 2. С. 93–98. DOI: 10.31857/S0205961423020057 [Переводная версия: *Vedeshin L.A. Intern. Cooperation in the Research and Use of Outer Space for Peaceful Purposes (on the 55<sup>th</sup> Anniversary of the Intercosmos Program)* // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023. V. 59. No. 9. P. 1249–1254. DOI: 10.1134/S0001433823090219. (**Scopus Q3, РИНЦ**)]
21. Пулинец С.А., Ведешин Л.А. Космос как природная плазменная лаборатория // Земля и Вселенная. 2023. № 6. С. 33–51. DOI: 10.7868/S0044394823060038. (**РИНЦ**)
22. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Милехин О.Е., Крамарева Л.С., Калашников А.В. Развитие информационных технологий распределенной работы с данными спутниковых центров НИЦ «Планета» // Метеорология и гидрология. 2023. № 6. С. 94–106. DOI: 10.52002/130-2906-2023-6-94-106. (**Web of Sciences, Scopus Q4**)
23. Пырков В.Н., Дегай А.Ю., Черных В.Н., Андреев М.В., Толпин В.А., Белоконь З.С. Развитие методов комплексного анализа отчетных данных о вылове и спутниковых позиций судов для верификации информации в системе мониторинга рыболовства на основе автоматической классификации треков // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 35-45. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-35-45. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
24. Златопольский А.А. Масштабная статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Модифицированные законы Хортона // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 87-95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-87-95. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
25. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Последствия повреждения плотины Каховской ГЭС на реке Днепр // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 314–322. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-314-322. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
26. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Развитие сельскохозяйственных культур в России в июне 2023 года по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 330–338. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-330-338. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
27. Шаповалов Д.А., Ведешин Л.А., Евстратова Л.Г., Антошкин А.А. Методы использования мультиспектральных снимков при экологическом мониторинге мелиорированных земель // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 187–201. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-187-201. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
28. Златопольский А.А. Структура раstra стока, построенного по цифровой модели рельефа // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 123–132. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-123-132. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
29. Биарсланов А.Б., Шинкаренко С.С., Гаджиев И.Р. Картографирование и анализ сезонной динамики площадей опустынивания на севере Дагестана по ежемесячным композитам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из

- космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 160–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
30. *Златопольский А.А.* Константность площади суммарного водосбора водотоков одного масштаба и распределение этого водосбора между водотоками большего масштаба // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 120–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-120-129. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
31. *Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Картографирование соровых понижений и солончаков в Северном Прикаспии на основе многолетних данных Landsat // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 153–165. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
32. *Котельников Р.В., Лупян Е.А., Балашов И.В.* Предварительный анализ горимости лесов Российской Федерации в пожароопасном сезоне 2023 года по данным дистанц. мониторинга // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 327–334. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-327-334. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
33. *Антипова Е.А., Балашов И.В., Беляев Р.Р., Брежнев Р.В., Бриль А.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маглинец Ю.А., Мазуров А.А.* Оценка возможности использования космической системы «Арктика М» для мониторинга природных пожаров на примере анализа данных 2023 года // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 335–342. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-335-342. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
34. *Шинкаренко С.С., Васильченко А.А., Выприцкий А.А., Берденгалиева А.Н.* Анализ влияния антропогенных нагрузок на процессы опустынивания в Северном Прикаспии по спутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 3. С. 44–57. DOI: 10.31857/S0205961423030065. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
35. *Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Ведешин Л.А., Шаповалов Д.А.* Использование нейронных сетей и облачных сервисов для выделения геометрий сельскохозяйственных полей на основе данных дистанц. зондирования Земли // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 6. С. 98–105. DOI: 10.31857/S0205961423060039. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
36. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Сравнение двухпозиционных лидарных систем в задаче интерпретации сигнала обратного рассеяния // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 2. С. 41–48. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-41-48. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)**
37. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Сравнение методов определения концентраций частиц модельного рассеивающего слоя лидаром упругого рассеяния // *Измерительная техника*. 2023. № 4. С. 38–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-4-38-43> **(RSCI, РИНЦ)**
38. *Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Ермаков Д.М.* Проблемы использования данных космической радиолокационной съёмки при решении задачи автоматизации ледового картирования // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)** (в печати)
39. *Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Костяной А.Г., Лаврова О.Ю.* К вопросу о горизонтальной циркуляции вод озера Севан (спутниковая информация) // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)** (в печати)
40. *Елизаров Д.А., Князев Н.А., Лаврова О.Ю., Уваров И.А.* Интеграция в спутниковую информационную систему See the Sea данных акустического доплеровского измерителя течений, полученных в ходе подспутниковых измерений // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 244–253. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-244-253. EDN: KEWOZM. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)**

41. *Ермаков Д.М., Смирнов М.Т.* Коррекция искажений спектров радиотеплового излучения атмосферы, получаемых по данным радиометра-спектрометра P22M при быстро меняющихся гидрометеорологических условиях // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 1. С. 67–75. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-67-75. EDN: FSCKJN. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
42. *Ермаков Д.М., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В., Втюрин С.А., Чернушич А.П.* Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 72. С. 470–492. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492. EDN: PWCVBV. (**RSCI, РИНЦ**)
43. *Костяной А.Г., Костяная Е.А., Лаврова О.Ю., Строчков А.Я.* Спутниковый мониторинг ледяного покрова в Азовском море в зимний период 2022/2023 гг. // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**) (в печати)
44. *Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Полухин А.А., Костылева А.В., Хлебонашев П.В., Соловьев Д.М., Жаданова П.Д.* Горизонтальная тонкая структура течения речных вод в дельте Волги по спутниковым данным высокого пространственного разрешения // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 254–267. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-254-267. EDN: ZJZWVT. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
45. *Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Алферьева Я.О., Соловьев Д.М., Жук Е.В.* Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 323–329. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329. EDN: WJNJAW. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
46. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Пространственная и временная изменчивость траекторий естественных нефтестроений на морской поверхности Южного Каспия, выявленная по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 4. С. 263–277. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-263-277. EDN: CFXTBH. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
47. *Романов А.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Тихонов В.В., Шадуйко О.М.* Связь сезонных вариаций радиояркостных температур акватории Карского моря с гидролого-климатическими изменениями в Арктике // *Изв. вузов. Физика*. 2023. № 4. С. 34–47. DOI: 10.17223/00213411/66/4/4. EDN: VMPCRT. (**RSCI, РИНЦ**)
48. *Садовский И.Н., Сазонов Д.С.* Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 6. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**) (в печати)
49. *Сазонов Д.С.* Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 5. С. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
50. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Тепловая помеха при регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства // *Акустический журнал*. 2023. Т. 69. № 6. С. 1–6. (**RSCI, РИНЦ**) [переводная версия: *Kudashev E.B., Yablonik L.R.* Thermal interference during registration of turbulent pressure fluctuations on the surface of a floating device // *Acoustical Physics*. 2023. V. 69. No. 6. P. 817–822. DOI: 10.31857/S0320791923600713 (**Web of Sciences-Q4; Scopus-Q2**)]
51. *Онищенко О.Г., Артеха С.Н., Фейгин Ф.З., Астафьева Н.М.* Модель генерации ограниченного в пространстве вихря в стратифицированной неустойчивой атмосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023. Т. 63. № 4. С. 511–519. DOI: 10.31857/S0016794023600047 (**RSCI, РИНЦ**) [переводная версия: *Onishchenko O.G., Artekha S.N., Feygin F.Z., Astafieva N.M.* Generation model of a spatially limited vortex in

- a stratified unstable atmosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023. V. 63. No. 4. P. 464–472. DOI: 10.1134/S0016793222600576 (**Web of Sciences-Q4; Scopus-Q3**)
52. *Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Михайлов М.В., Шерстюков Б.Г.* Космические регуляторы климата Земли 3 // *Астрономический вестник*. 2023. Т. 57. № 6. С. 521–531. DOI: 10.31857/S0320930X23060014, EDN: DBABWW. (**SCOPUS-Q3**)

### Статьи в сборниках материалов конференций

53. *Кашицкий А.В., Антошкин А.А., Денисов П.В., Толпин В.А., Трошко К.А.* Верификация информации о местах произрастания сельскохозяйственных культур на основе среднего значения индекса NDVI на поле // 10-я Международ. научн. конф. «Региональные проблемы дистанц. зондирования Земли». Красноярск, 12–15 сент. 2023 / научн. ред. Е.А. Ваганов: Электрон. науч. изда. 2023. (**РИНЦ**)
54. *Константинова А.М., Луян Е.А., Кашицкий А.В., Саворский В.П.* Возможности использования технологии объектного мониторинга для исследования районов расположения крупных антропогенных объектов // Сб. тр. Всероссийской конф. с международ. участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2023) [Электронный ресурс]. 22–25 авг. 2023, Бердск. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 82–86. DOI: 10.25743/sdm.2023.76.54.014. (**РИНЦ**)
55. *Гирина О.А., Луян Е.А., Сорокин А.А., Романова И.М., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Крамарева Л.С., Королев С.П., Нурдаев А.А., Уваров И.А.* Информационные технологии для выявления и анализа термальной активности вулканов Камчатки и Курильских островов в 2021–2022 гг. // Материалы 7-й Международ. научно-практ. конф. «Информац. технологии и высокопроизводительные вычисления». 11–13 сент. 2023. Хабаровск: ХФИЦ ДВО РАН, 2023. С. 52–56. (**РИНЦ**)
56. *Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Романова И.М., Луян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Цветков В.А., Демянчук Ю.В.* Пароксизмальные эксплозивные извержения вулкана Безымянный в 2022 г. и их опасность для авиации // Материалы 26-й Ежегод. науч. конф., посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский. 30–31 марта, 2023. С. 42–45. (**РИНЦ**)
57. *Ермаков Д.М., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В., Втюрин С.А., Стерлядкин В.В., Чернушич А.П.* Возможности спутникового радиотепловидения для мониторинга регионального гидрологического баланса и предупреждения стихийных бедствий // Материалы 7-й Международ. научно-практ. конф. «Фундам. и приклад. аспекты геологии, геофизики и экологии с использованием современ. информацион. технологий». 2023. Ч. 1. С. 136–141. EDN: IROZYS. (**РИНЦ**)

### Материалы конференций

58. *Бриль А.А., Луян Е.А., Бурцев М.А.* Технология построения продуктов композитных изображений по малым газовым составляющим // 7-я Международ. научно-практ. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», посвященная 120-летию со дня рождения акад. А.Н. Севченко, 18–19 мая 2023. Минск, 2023. С. 399–401. (**РИНЦ**)
59. *Волкова Е.Е., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Бурцев М.А.* Уточнение географической привязки данных прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 // 7-я Международ. научно-практическая конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», посвященная 120-летию со дня рождения академика А.Н. Севченко. 18–19 мая 2023. Минск, 2023. С. 402–403. (**РИНЦ**)

60. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Методика оперативной оценки площади пирогенной гибели лесов на основе данных об интенсивности горения пожаров // 7-я Международ. научно-практ. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», посвященная 120-летию со дня рождения академика А.Н. Севченко, 18–19 мая 2023, Минск. 2023. С. 419–421. (РИНЦ)
61. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Толпин В.А., Уваров И.А. Создание и эксплуатация современных информационных систем дистанц. мониторинга // 8-я Международ. научно-техн. конф. «В.Ф. Уикин — 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2023. С. 40–42.
62. Врублевский М.В., Бурцев М.А. Система мониторинга уровня воды внутренних водоемов на основе данных альтиметрии // 8-я Международ. научно-техн. конф. «В.Ф. Уикин — 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2023. С. 279–280.
63. Бурцев М.А., Кобец Д.А., Матвеев А.М., Прошин А.А. Проблемы организации потоковой обработки данных в сверхбольших информационных системах дистанц. мониторинга // 8-я Международ. научно-техн. конф. «В.Ф. Уикин — 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2023. С. 281–282.
64. Волкова Е.Е., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Бурцев М.А. Развитие метода уточнения геопривязки данных прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2-2 // 8-я Международ. научно-техн. конф. «В.Ф. Уикин — 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2023. С. 282–284.
65. Лозин Д.В., Матвеев А.М., Лупян Е.А. Адаптация алгоритма детектирования пожаров для работы с данными прибора МСУ-МР // 11-я Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 2023. С. 123–125.
66. Матвеев А.М., Мазуров А.А., Прошин А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Евсеев Г.Е., Стрельцов А.М., Черный И.В. Обработка и создание архива данных прибора МТВЗА в интересах научных исследований // 11-я Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 2023. С. 147–148.
67. Волкова Е.Е., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Бурцев М.А. Автоматизированное уточнение географической привязки данных прибора МСУ-МР // 11-я Международная научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 2023. С. 151–152.
68. Кашицкий А.В., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Исследование пригодности данных различного пространственного разрешения для мониторинга объектов // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 27. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
69. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Результаты объективной оценки привязки продуктов VIIRS на основе спутниковых данных Sentinel-2 // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 32. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
70. Волкова Е.Е., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Бурцев М.А. Технология автоматического уточнения привязки данных прибора МСУ-МР КА серии «Метеор-М» // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 75. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)



71. *Котельников Р.В., Лупян Е.А., Балашов И.В.* Тенденции относительной горимости лесов в зонах контроля лесных пожаров, оцененные по данным дистанц. зондирования Земли из космоса // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 90. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
72. *Лозин Д.В., Матвеев А.М., Лупян Е.А.* Детектирование пожаров по данным МСУ-МР на основе алгоритма MOD14 // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 95. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
73. *Балашов И.В., Лупян Е.А., Сенько К.С.* Анализ возможностей адаптации технологий мониторинга пожаров по данным MODIS к данным VIIRS // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 64. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
74. *Радченко М.В., Кашицкий А.В., Лупян Е.А., Бурцев М.А., Юдин Д. А.* Инфраструктура центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг: текущее состояние и перспективы развития // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 103. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
75. *Сычков А.А., Трошко К.А.* Сопоставление данных реанализа NCEP с данными ресурса «Расписание погоды» на территории Российской Федерации // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 107. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
76. *Бриль А.А., Волкова Е.Е., Бурцев М.А.* Методы оценки высоты облачности с использованием возможностей системы «Арктика-М» // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 67. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
77. *Врублевский М.В., Константинова А.М., Бурцев М.А.* Интерфейс для работы с данными альтиметрии для мониторинга внутренних водоёмов // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 76. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
78. *Дегай А.Ю., Черных В.Н., Пырков В.Н., Андреев М.В.* Рассмотрение возможности определения ледового покрытия на основе спутниковых данных оптического и ближнего инфракрасного диапазона для Карского моря // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 79. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
79. *Марченков В.В., Гирина О.А., Лупян Е.А., Уваров И.А.* Система совместного анализа временных рядов наблюдений вулканической активности по данным низкоорбитальных и геостационарных спутников // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 97. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
80. *Биарсланов А.Б., Шинкаренко С.С., Гаджиев И.Р.* Применение ежемесячных композитных изображений Sentinel-2 для анализа сезонных изменений площадей подвижных песков // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 352. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
81. *Кашицкий А.В., Антошкин А.А., Денисов П.В., Толпин В.А., Трошко К.А.* Метод получения информации о местах произрастания сельскохозяйственных культур на основе хода индекса NDVI на поле // Материалы 21-й Международ. конф.

- «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 372. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
82. Сычков А.А., Трошко К.А. Разработка автоматизированной системы совместного анализа спутниковых и статистических данных для оценки урожайности сельскохозяйственных культур // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 402. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
83. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Развитие сельскохозяйственных культур в России в 2023 году на основе данных дистанц. мониторинга // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 409. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
84. Антошкин А.А., Кашицкий А.В., Руткевич Б.П., Трошко К.А. Создание масок пахотных земель по данным спутниковых наблюдений с использованием алгебры изображений // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 350. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
85. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 383. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
86. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Метод картографирования сорových понижений и солончаков Северного Прикаспия по данным Landsat // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 419. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
87. Денисов П.В., Трошко К.А., Щербаков А.С., Полецкая А.Ю. Практический опыт применения технологий спутникового мониторинга земель сельскохозяйственного назначения при решении региональных задач АПК в среде аграрных вузов (мастер-класс) // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 462. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
88. Бриль А.А., Антипова Е.А., Балашов И.В., Брежнев Р.В., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маглинец Ю.А., Мазуров А.А., Раевич К.В. Потенциальные возможности системы «Арктика М», как инструмента для мониторинга природных пожаров // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 66. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
89. Лупян Е.А., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю. Двадцать лет журналу «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 5. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
90. Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурдаев А.А., Бриль А.А., Озеров А.Ю., Крамарева Л.С., Сорокин А.А., Королев С.П. Мониторинг пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 г. дистанционными методами // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 77. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
91. Денисов П.В., Трошко К.А., Полецкая А.Ю., Гогачева Н.А., Ленник А.В., Лупян Е.А. Исследование возможности использования методов спутникового мониторинга для объективного контроля данных сельскохозяйственной статистики // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из

- космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 80. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
92. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Сорокин А.А., Романова И.М., Крамарева Л.С., Уваров И.А., Королев С.П., Демянчук Ю.В., Цветков В.А.* Дистанционный мониторинг эксплозивных извержений вулкана Безымянный в 2023 г. // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 330. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
93. *Ермаков Д.М., Лупян Е.А.* Всероссийский семинар «Проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 3. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
94. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Метод определения эквивалентной концентрации частиц в рассеивающем слое для лидара упругого рассеяния // Тр. 17-й Международ. научно-техн. конф. «Оптич. методы исслед. потоков». 2023. С. 355–363. ISBN 978-5-6051133-2-4. <https://omfi-conf.ru/omfi2023/OMFI-2023-Proceedings.pdf>. (РИНЦ)
95. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Миниатюризация лидаров для создания режима зондирования малых объёмов при постоянном значении сигнала обратного рассеяния // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 139. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
96. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Сопоставление конфигураций лидаров упругого рассеяния для использования минимального набора калибровочных инструментов // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 138. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ)
97. *Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Ермаков Д.М.* Проблемы использования спутниковых радиолокационных данных при решении задачи автоматизации ледового картирования в рамках специализированного гидрометеорологического обеспечения // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 276. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. (РИНЦ)
98. *Елизаров Д.А., Краюшкин Е.В.* Интеграция и работа с данными акустического доплеровского измерителя течений в информационной системе See the Sea // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 82. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. (РИНЦ)
99. *Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю.* Субмезомасштабные вихревые образования в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря по данным дистанц. спутникового зондирования в оптическом диапазоне в период 2014–2023 гг. // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 217. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. (РИНЦ)
100. *Кузьмин А.В., Ермаков Д.М., Суровяткина Е.Д., Пашинов Е.В., Втюрин С.А.* Анализ поля интегрального влагосодержания атмосферы в районе южноазиатского муссона близ Индии по данным спутниковых микроволновых радиометров // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 156. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. (РИНЦ)
101. *Кузьмин А.В., Садовский И.Н., Стерлядкин В.В., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В., Втюрин С.А.* Комплексный эксперимент по исследованию статистических связей ветрового поля с оптическими и микроволновыми характеристиками морской поверхности на черноморском гидрофизическом полигоне «Кацивели» // Материалы

- 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 218. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
102. *Лаврова О.Ю., Князев Н.А.* Спутниковый мониторинг плюмов рек Терек и Сулак в 2014–2022 гг. // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 222. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
103. *Митягина М.И.* Естественные нефтепроявления на морской поверхности Южного Каспия // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 231. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
104. *Рябинин И.В., Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В.* О взаимовлиянии гидрологических изменений в арктических и внутриконтинентальных регионах Северной Евразии // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 245. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
105. *Садовский И.Н., Сазонов Д.С.* Результаты натурных измерений эффективной излучательной способности водной среды в присутствии ветрового волнения // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 247. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
106. *Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Садовский Н.В.* Выявление сбоев в работе МТВЗА-ГЯ на основе анализа качества геопривязки // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 49. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
107. *Сазонов Д.С., Садовский И.Н.* Сведение лучей визирования «высокочастотных» каналов МТВЗА-ГЯ // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 51. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
108. *Стерлядкин В.В., Куликовский К.В.* Достижения и трудности лазерных методов измерения параметров морского волнения // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 259. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
109. *Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А.* Моделирование сезонной динамики яркостной температуры замерзающих водных объектов с учетом попадания в пиксель радиометра участков суши, на примере Енисейского залива и данных спутника SMOS // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 293. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ)**
110. *Якушева А.Н., Ермаков Д.М.* Развитие процедур автоматического детектирования и локализации центров тропических циклонов на спутниковых изображениях // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 184. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. **(РИНЦ)**
111. *Шкевов Р., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.* Влияние глобального потепления на изменение климата в юго-западной зоне Черного моря // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 183. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a; ISBN 978-5-00015-065-8 **(РИНЦ)**
112. *Левина Г.В.* Как рождается ураган: двухмасштабное вихревое динамо // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 157. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a; ISBN 978-5-00015-065-8 **(РИНЦ)**

113. *Полянский И.В., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В.* Первые результаты работы комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на космическом аппарате «Метеор-М» № 2-3 // 21-я Международная конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса», Россия, Москва, 13–17 нояб. 2023. 2023. С. 134. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a; ISBN 978-5-00015-065-8. (РИНЦ)

#### Тезисы, доклады, циркуляры

114. *Ипатов А.В., Ведешин Л.А.* Активные космические эксперименты в ионосфере и магнитосфере Земли с использованием энергии радиоволн ВЧ диапазона // 10-я Всероссийская конф. с международн. участием «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023). 17–21 апр. 2023. Санкт-Петербург: сб. тез. докл. 2023. С. 88.
115. *Радченко М.В., Кашицкий А.В., Луян Е.А., Бурцев М.А., Юдин Д. А.* Центр коллективного пользования Института косм. исследований: инфраструктура хранения, обработки и предоставления больших объемов спутниковых данных наблюдения Земли // 12-й Национальный суперкомпьютерный форум (НСКФ-2023). Переславль-Залесский. 28 нояб. – 1 декабря 2023: тез. докл. 2023.
116. *Руткевич П.Б.* Крупномасштабная вихревая неустойчивость в декартовой системе координат // Научно-производственное объединение «Тайфун».
117. *Луян Е.А., Барталев С.А.* Комплексный спутниковый мониторинг состояния лесов. Актуальные задачи и современные возможности (пленарный) // 7-я Международ. научно-практическая конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», посвященная 120-летию со дня рождения академика А.Н. Севченко. Минск. 18–19 мая 2023.
118. *Луян Е.А., Бурцев М.А.* ЦКП «ИКИ-Мониторинг» — инструмент коллективной работы с данными дистанц. наблюдения Земли (возможности и опыт использования) // 10-й Международ. форум технологического развития «Технопром-2023». Круглый стол «Космическое и воздушное пространство, Мировой океан, Арктика и Антарктика: как добиться связанности территорий за счёт создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем». Новосибирск. 2013.
119. *Луян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А.* Создание, внедрение и поддержка информационных систем дистанц. мониторинга // Всероссийская конф. с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». 22–25 авг/ 2023. Бердск.
120. *Луян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Крашенинникова Ю.С.* Опыт создания и эксплуатации информационных систем дистанц. мониторинга // 19-я Научно-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанц. зондирования Земли». пгт. Дзубга (Краснодарский край), 17–23 сент. 2023.
121. *Луян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Денисов П.В., Трошко К.А.* Опыт создания и эксплуатации информационных систем и сервисов дистанц. мониторинга в интересах решения региональных задач // 10-я Международ. науч. конф. «Региональные проблемы дистанц. зондирования Земли». Красноярск. 12–15 сент. 2023.
122. *Plotnikov D., Elkina E., Antoshkin A., Denisov P., Shcherbenko E.* Mapping thirty-year cropland dynamics of Russian regions with reconstructed time series of Landsat data // The 7<sup>th</sup> Digital Belts and Road Conference. Beijing, China, 4–6 Sept. 2023.
123. *Bartalev S.A.* Remote sensing data analysis for national forest and carbon budget monitoring in Russia // Intern. Conf. “Forest ecosystems in the conditions of climate change: biological productivity and remote sensing”. Yoshkar-Ola, 10–11 Oct.
124. *Bartalev S., Egorov V., Fedorov S., Khovratovich T., Khvostikov S., Loupian E., Lukina N., Stytsenko E., Stytsenko F., Veчерov V., Zharko V.* Integration of the remote



- sensing data and extensive network of in-situ samples for national monitoring of carbon budget in Russian forests // Symp. "Observations within the Global Greenhouse Gas Watch". Geneva. 3–5 Oct. 2023/
125. Лозин Д.В., Матвеев А.М., Лулян Е.А. Адаптация алгоритма детектирования пожаров для работы с данными прибора МСУ-МР // 11-я Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 10 октября. ВНИИЭМ.
  126. Волкова Е.Е., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Бурцев М.А. Автоматизированное уточнение географической привязки данных прибора МСУ-МР // 11-я Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 10 октября. ВНИИЭМ.
  127. Матвеев А.М., Мазуров А.А., Прошин А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Евсеев Г.Е., Стрельцов А.М., Черный И.В. Обработка и создание архива данных прибора МТВЗА в интересах научных исследований // 11-я Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 10 окт. 2023. ВНИИЭМ.
  128. Bartalev S.A. Time series remote sensing data analysis for national forest and carbon budget monitoring in Russia // Symp. "Technical Workshop on AI-ML Applications in Industry and Space Systems at URSC". Bangalore, India, 20–26 Sept. 2023.
  129. Барталев С.А. Применение методов дистанц. зондирования из космоса для мониторинга бюджета углерода в наземных экосистемах России: Цикл лекций «Климатическая повестка: вызовы и возможности» на Фестивале НАУКА 0+. МГУ. 7 окт. 2023.
  130. Стыценок Ф.В., Барталев С.А. Картографирование последствий воздействия природных пожаров на лесные экосистемы России // Международ. конф. «15-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу». Томск. 18–20 окт. 2023.
  131. Plotnikov D., Kolbudaev P., Loupian E., Denisov P. The performance of Vega platform and Russian Meteor-M constellation for agriculture satellite monitoring // Intern. Workshop on Geography and Sustainability, 2023. Beijing, China, 27 Oct.
  132. Лулян Е.А. Опыт построения информационных систем дистанц. мониторинга (роль МКС в создании и использовании) // 10-я Международ. неделя авиакосм. технологий Aerospace Science Week, М.: МАИ. 20-24 нояб. 2023.
  133. Burtsev M.A., Balashov I.V. Application of MERSI instruments data in national fire monitoring systems // The 2023 FENGYUN Satellite User Conf. Xiamen, Fujian Province of China. 13–15 Nov. 2023.
  134. Шинкаренко С.С., Литвинова Н.В., Барталев С.А. Перспективы определения эмиссий парниковых газов при тростниковых пожарах на основе данных дистанц. зондирования Земли // Всероссийская конф. «Антропоген. трансформация геопространства». Волгоградский гос. уни-т. 12 дек. 2023.
  135. Левина Г.В. Необходимо ли в России изучать и самостоятельно диагностировать черноморские квазитропические циклоны? // Международ. конф. «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023». 9–13 окт. 2023 г. Москва: сб. тез. докл. С. 58. М.: Физматкнига, 2023. ISBN 978-5-89155-397-2 <http://ifaran.ru/science/conferences/climate2023.html> (РИНЦ)
  136. Levina G. A first application of the turbulent vortex dynamo theory for exact diagnosing the tropical cyclogenesis over the North Indian Ocean // 6<sup>th</sup> Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes. Moscow, Russia, Oct. 11–12, 2022: Book of Abstracts /Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS. Novosibirsk, 2023. P. 6. <http://conf.nsc.ru/mhd2023/en>
  137. Левина Г.В. Турбулентное вихревое динамо — универсальный механизм образования интенсивных долгоживущих вихрей в атмосфере. 2023. Т. 2. С. 614–616.

DOI:10.18720/SPBPU/2/id23-628 // 13-й Всероссийский съезд по теор. и приклад. механике. Санкт-Петербург, 21–25 августа, 2023: сб. тез. докл. Т. 1. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2023. (РИНЦ)

## Патенты

138. *Князев Н.А., Елизаров Д.А., Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Краюшкин Е.В.* База данных океанологических подспутниковых измерений: гидрологического STD-зонда и акустического доплеровского измерителя течений ADCP (db in situ): Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2023624017. 16 нояб. 2023 г.

## Публикации (РНФ)

1. *Plotnikov D.E., Kolbudaev P.A., Matveev A.M., Proshin A.A., Polyanskiy I.V.* Accuracy Assessment of Atmospheric Correction of KMSS-2 Meteor-M #2.2 Data over Northern Eurasia // Remote sensing. 2023. V. 15. Iss. 18. Article 4395. DOI: doi.org/10.3390/rs15184395. (Web of science, Scopus) РНФ
2. *Plotnikov D.E.* Mapping thirty-year cropland dynamics of Russian regions with reconstructed time series of Landsat data // 7<sup>th</sup> Digital Belts and Road Conf. 2023. P. 41.
3. *Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Богодухов М.А., Ворушилов И.И., Сайгин И.А.* Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанц. зондирования и гидролог/ информации // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 119-135. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135. (Scopus) РНФ
4. *Шинкаренко С.С., Васильченко А.А.* Анализ современного состояния нерестилиц Нижнего Дона по данным дистанц. зондирования // Вестн. Московского ун-та. 2023. Сер. 5. География. № 1. С. 16–27. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.2. РНФ
5. *Plotnikov D.E.* Mapping thirty-year cropland dynamics of Russian regions with reconstructed time series of Landsat data // 7<sup>th</sup> Digital Belts and Road Conf. 2023. P. 41. РНФ
6. *Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Ёлкина Е.С., Зимин М.В., Чжоу Ч.Ц., Зоров А.А., Лебедев С.В.* Дистанционная оценка биофизических характеристик растительного покрова по данным спутниковой системы «Метеор-М» (КМСС) и нейросетевой инверсии RT-модели // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 100. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ) РНФ
7. *Бутаков Н.Ю., Уваров И.А., Цепелев В.Ю.* Использование моделей WRF и SWAN и их интеграция в ИС See the Caspian Sea // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 69. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ) РНФ
8. *Уваров И.А., Костяной А.Г., Лаврова О.Ю.* Разработка информационной системы мониторинга Каспийского моря See the Caspian Sea на основе спутниковых и метеорологических данных // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 110. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. (РИНЦ) РНФ
9. *Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Хвостов И.В., Романов А.Н.* О возможности определения сплоченности ледяного покрова арктических морей по данным спутника SMOS // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. (в печати) (Scopus Q3, RSCI, РИНЦ). РНФ
10. *Жаданова П.Д., Назирова К.Р.* Анализ и верификация алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества, имплементированных в

- программный комплекс ACOLITE // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 50–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68. EDN: EEIGIJ. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ). РФФ**
11. Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Алферьева Я.О., Князев Н.А. Пространственно-временная изменчивость плюмов рек Терек и Сулак по спутниковым данным и синхронным натурным измерениям // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 285–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303. EDN: JAHSZC. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ). РФФ**
  12. Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Экспериментальные исследования эффективной излучательной способности взволнованной морской поверхности // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023 (в печати) **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ). РФФ**
  13. Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Хвостов И.В., Романов А.Н. Анализ сплоченности ледяного покрова в Карском море по данным спутника SMOS // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 294. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ). РФФ**
  14. Алексеева Т.А., Макаров Е.И., Ермаков Д.М., Тихонов В.В., Сероветников С.С., Бородкин В.А., Соколова Ю.В. Развитие технологии комплексного проведения специальных судовых ледовых наблюдений и подспутниковых измерений собственного микроволнового излучения морского льда в Арктике с борта атомных ледоколов SMOS // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 275. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. ISBN 978-5-00015-065-8. **(РИНЦ). РФФ**
  15. Жаданова П.Д., Назирова К.Р. Определение мутности и концентрации взвешенного вещества с помощью алгоритмов, встроенных в программный комплекс ACOLITE: анализ и верификация // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 205. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. **(РИНЦ). РФФ**
  16. Назирова К.Р., Лаврова О.Ю. Восстановление трехмерной структуры плюма р. Терек и Сулак по спутниковым данным и измерениям in situ // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 233. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. **(РИНЦ). РФФ**
  17. Уваров И.А., Костяной А.Г., Лаврова О.Ю. Разработка информационной системы мониторинга Каспийского моря See the Caspian Sea на основе спутниковых и метеорологических данных // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 110. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a. **(РИНЦ). РФФ**
  18. Shalimov S.L., Zakharov V.I., Solov'eva M.S., Sigachev P.K., Nekrasov M.Yu., Korkina G.M. Wave Perturbations of the Lower and Upper Ionosphere during the 2019 Faxai Tropical Typhoon // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. V. 63. P. 186–196. DOI: 10.1134/S0016793222600576 **(Web of Sciences-Q4; Scopus-Q3) РФФ**
  19. Алексеева Т.А., Макаров Е.И., Бородкин В.А., Сероветников С.С., Санерштейн Е.Б., Соколова Ю.В., Котельников В.Д. Развитие методики проведения специальных судовых ледовых наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 4. С. 394–406. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-394-406> **(RSCI, РИНЦ) РФФ**

## Минобрнауки

1. Стыценок Ф.В., Барталев С.А. Картографирование последствий воздействия природных пожаров на лесные экосистемы России // Материалы докл. всероссийской

- конф. с междунар. участием «Пятнадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу» / под ред. Е.А. Головацкой. Томск, 2023. С. 338–341.
2. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Перспективы картографирования фитомассы тростниковых сообществ в пойменных и дельтовых ландшафтах Нижней Волги // Материалы 21-й международной конференции «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 13–17 нояб. 2023, ИКИ РАН, Москва. 2023. С. 418. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.

#### Публикации в соавторстве с зарубежными авторами

1. Wu B., Zhang M., Zeng H., Tian F., Potgieter A.B., Yan N., Chang S., Zhao Y., Dong Q., Boken V., Plotnikov D.E., Guo H., Wu F., Zhao H., Deronde B., Tits L., Loupian E.A. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review // National Science Review. 2023. article nwac290. DOI: doi.org/10.1093/nsr/nwac290.
2. Nose T., Rabault J., Waseda T., Kodaira T., Fujiwara Y., Katsuno T., Kanna N., Tateyama K., Voermans J., Alekseeva T. A comparison of an operational wave-ice model product and drifting wave buoy observation in the central Arctic Ocean: investigating the effect of sea-ice forcing in thin ice cover // Polar Research. 2023. V. 42. Article 8874. 13 p. <http://dx.doi.org/10.33265/polar.v42.8874>. (**Web of Science Q3, Scopus Q2**)
3. Шкевов Р., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. Влияние глобального потепления на изменение климата в юго-западной зоне Черного моря // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». 2023. С. 201. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a (**РИНЦ**)

#### Публикации по теме Мониторинг в рецензируемых изданиях

1. Wu B., Zhang M., Zeng H., Tian F., Potgieter A.B., Yan N., Chang S., Zhao Y., Dong Q., Boken V., Plotnikov D.E., Guo H., Wu F., Zhao H., Deronde B., Tits L., Loupian E.A. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review // National Science Review. 2023. nwac290. DOI: doi.org/10.1093/nsr/nwac290. (**Web of Science, Scopus**)
2. Girina O.A., Manevich A.G., Loupian E.A., Uvarov I.A., Korolev S.P., Sorokin A.A., Romanova I.M., Kramareva L.S., Burtsev M.A. Monitoring the Thermal Activity of Kamchatkan Volcanoes during 2015–2022 Using Remote Sensing // Remote Sensing. 2023. V. 15, Iss. 19. DOI: 10.3390/rs15194775. (**Web of Science, Scopus Q1, РИНЦ**)
3. Alekseeva T.A., May R.I., Fedyakov V.Ye., Makarov Y.I., Klyachkin S.V., Dyment L.N., Grishin Y.A., Ershova A.A., Krupina N.A. Ice Automatic Routing: Analysis of Simulation Testing Based on Voyages of Arc7 Class Vessels in the Arctic // Intern. J. Offshore and Polar Engineering. 2023. V. 33. No. 3. P. 234–241. <https://doi.org/10.17736/ijope.2023.ik12>. (**Web of Science Q4, Scopus Q3, РИНЦ**)
4. Arumov G.P., Bukharin A.V. Opticophysical Measurements. Comparison of Methods of Determining Particle Concentrations in a Model Scattering Layer for an Elastic Scattering Lidar // Measurement Techniques. 2023. V. 66. No. 4. P. 252–258. DOI: 10.1007/s11018-023-02218-5. (**Web of Science, Scopus Q4, RSCI, РИНЦ**).
5. Arumov G.P., Bukharin A.V. Selection of the optimal paths for remote measurements of the microstructure of a scattering object // Measurement Techniques. 2023. V. 65. No. 10. P. 734–741. DOI: 10.1007/s11018-023-02146-4. (**Web of Science, Scopus Q4 RSCI, РИНЦ**).

6. *Gusev A., Martin I., Alves M.* On the Possibility of the use of Tube Counters in Neutron Spectrometry // SSRG Intern. J. Applied Physics. 2023. V. 10. No. 1. P. 18–21. DOI: 10.14445/23500301/IJAP-V10I1P103
7. *Levina G.V.* Helical cyclogenesis as an extreme threshold phenomenon in a rotating stratified moist atmosphere // *Frontiers in Earth Science*. 2023. V. 11. Article 1296067. DOI: 10.3389/feart.2023.1296067 (**Web of Sciences-Q2; Scopus-Q1**)
8. *Федоринов А.В., Волков С.Н., Денисов П.В., Козубенко И.С., Комаров С.И., Кононов В.М., Лепехин П.П., Лупян Е.А., Петрова Л.Е., Сорокина О.А., Трошко К.А., Холодов Д.В., Черкашина Е.В., Шаповалов Д.А., Антропов Д.В.* Установление границ земель сельскохозяйственного назначения (опыт пилотных регионов): монография / общая ред. Федоринова А.В. М.: РАДУГА, 2023. 420 с. ISBN 978-5-9215-0592-6. (**РИНЦ**)
9. *Барталев С.А., Бурнаев Е.В., Вербя В.С., Ивлиев Н.А., Казанский Н.Л., Каперко А.Ф., Лупян Е.А., Никоноров А.В., Скиданов Р.В., Черниенко А.А.* Мультиспектральный интеллектуальный мониторинг природной и техногенной среды: монография / под ред. акад. РАН В.Я. Панченко. Самара: Новая техника, 2023. 184 с. ISBN 978-5-88940-164-3.
10. *Ермаков Д.М., Лупян Е.А.* Всероссийский семинар «Проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (**Scopus Q3, РИНЦ**) (в печати)
11. *Лупян Е.А., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю.* Двадцать лет журналу «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (**Scopus Q3, РИНЦ**) (в печати)
12. *Лаврова О.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А., Кобец Д.А.* Двадцать первая международная конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса» // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (**Scopus Q3, РИНЦ**) (в печати)
13. *Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А.* Особенности развития сельскохозяйственных культур в России в 2023 году по данным спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (**Scopus Q3, РИНЦ**) (в печати)
14. *Ведешин Л.А., Шаповалов Д.А., Евстратова Л.Г.* Первые российские научные эксперименты по изучению природной среды с помощью беспилотных летательных аппаратов // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 6. (**Scopus Q3, РИНЦ**) (в печати)
15. *Кашицкий А.В., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А.* Анализ возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга объектов // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 2. С. 60–74. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-60-74. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
16. *Златопольский А.А., Шекман Е.А.* Порядковая и масштабная статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 2. С. 125–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-125-134. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
17. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурдаев А.А., Бриль А.А., Озеров А.Ю., Крамарева Л.С., Сорокин А.А.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 2. С. 283–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
18. *Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балаилов И.В., Барталев С.А.* Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности



- горения // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 292–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
19. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Особенности развития озимых сельскохозяйственных культур в южных и центральных регионах России весной 2023 года по данным дистанц. мониторинга // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 302–308. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-302-308. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
  20. Ведешин Л.А. Международное сотрудничество в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях (К 55-летию программы «Интеркосмос») // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 2. С. 93298. DOI: 10.31857/S0205961423020057. Переводная версия: *Vedeshin L.A. Intern. Cooperation in the Research and Use of Outer Space for Peaceful Purposes (on the 55th Anniversary of the Intercosmos Program) // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. No. 9. P. 1249–1254. DOI: 10.1134/S0001433823090219. (Scopus Q3, РИНЦ)*
  21. Пулинец С.А., Ведешин Л.А. Космос как природная плазменная лаборатория // Земля и Вселенная. 2023. № 6. С. 33–51. DOI: 10.7868/S0044394823060038. (**РИНЦ**)
  22. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Милехин О.Е., Крамарева Л.С., Калашников А.В. Развитие информационных технологий распределенной работы с данными спутниковых центров НИЦ «Планета» // Метеорология и гидрология. 2023. № 6. С. 94–106. DOI: 10.52002/130-2906-2023-6-94-106. (**Web of science, Scopus Q4**)
  23. Пырков В.Н., Дегай А.Ю., Черных В.Н., Андреев М.В., Толпин В.А., Белоконь З.С. Развитие методов комплексного анализа отчетных данных о вылове и спутниковых позиций судов для верификации информации в системе мониторинга рыболовства на основе автоматической классификации треков // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 35–45. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-35-45. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
  24. Златопольский А.А. Масштабная статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Модифицированные законы Хортона // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 87–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-87-95. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
  25. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Последствия повреждения плотины Каховской ГЭС на реке Днепр // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 314–322. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-314-322. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
  26. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Развитие сельскохозяйственных культур в России в июне 2023 года по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 330–338. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-330-338. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
  27. Шаповалов Д.А., Ведешин Л.А., Евстратова Л.Г., Антошкин А.А. Методы использования мультиспектральных снимков при экологическом мониторинге мелиорированных земель // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 187–201. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-187-201. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
  28. Златопольский А.А. Структура раstra стока, построенного по цифровой модели рельефа // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 123–132. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-123-132. (**Scopus Q3, РИНЦ**)
  29. Биарсланов А.Б., Шинкаренко С.С., Гаджиев И.Р. Картографирование и анализ сезонной динамики площадей опустынивания на севере Дагестана по ежемесячным композитам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из

- космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 160–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
30. *Златопольский А.А.* Константность площади суммарного водосбора водотоков одного масштаба и распределение этого водосбора между водотоками большего масштаба // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 120–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-120-129. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
31. *Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Картографирование соровых понижений и солончаков в Северном Прикаспии на основе многолетних данных Landsat // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 153–165. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
32. *Котельников Р.В., Лупян Е.А., Балашов И.В.* Предварительный анализ горимости лесов Российской Федерации в пожароопасном сезоне 2023 года по данным дистанц. мониторинга // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 327–334. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-327-334. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
33. *Антипова Е.А., Балашов И.В., Беляев Р.Р., Брежнев Р.В., Бриль А.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маглинец Ю.А., Мазуров А.А.* Оценка возможности использования космической системы «Арктика М» для мониторинга природных пожаров на примере анализа данных 2023 года // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 335–342. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-335-342. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
34. *Шинкаренко С.С., Васильченко А.А., Выприцкий А.А., Берденгалиева А.Н.* Анализ влияния антропогенных нагрузок на процессы опустынивания в Северном Прикаспии по спутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 3. С. 44–57. DOI: 10.31857/S0205961423030065. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
35. *Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Ведешин Л.А., Шаповалов Д.А.* Использование нейронных сетей и облачных сервисов для выделения геометрий сельскохозяйственных полей на основе данных дистанц. зондирования Земли // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 6. С. 98–105. DOI: 10.31857/S0205961423060039. **(Scopus Q3, РИНЦ)**
36. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Сравнение двухпозиционных лидарных систем в задаче интерпретации сигнала обратного рассеяния // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 2. С. 41–48. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-41-48. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)**
37. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Сравнение методов определения концентраций частиц модельного рассеивающего слоя лидаром упругого рассеяния // *Измерительная техника*. 2023. № 4. С. 38–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-4-38-43> **(RSCI, РИНЦ)**
38. *Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Ермаков Д.М.* Проблемы использования данных космической радиолокационной съёмки при решении задачи автоматизации ледового картирования // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (в печати) **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)**
39. *Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Костяной А.Г., Лаврова О.Ю.* К вопросу о горизонтальной циркуляции вод озера Севан (спутниковая информация) // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (в печати) **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)**
40. *Елизаров Д.А., Князев Н.А., Лаврова О.Ю., Уваров И.А.* Интеграция в спутниковую информационную систему See the Sea данных акустического доплеровского измерителя течений, полученных в ходе подспутниковых измерений // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 244–253. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-244-253. EDN: KEWOZM. **(Scopus Q3, RSCI, РИНЦ)**

41. *Ермаков Д.М., Смирнов М.Т.* Коррекция искажений спектров радиотеплового излучения атмосферы, получаемых по данным радиометра-спектрометра P22M при быстро меняющихся гидрометеорологических условиях // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 1. С. 67–75. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-67-75. EDN: FSCKJN. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
42. *Ермаков Д.М., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В., Втюрин С.А., Чернушич А.П.* Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 72. С. 470–492. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492. EDN: PWCVBV. (**RSCI, РИНЦ**)
43. *Костяной А.Г., Костяная Е.А., Лаврова О.Ю., Строчков А.Я.* Спутниковый мониторинг ледяного покрова в Азовском море в зимний период 2022/2023 гг. // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. (в печати) (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
44. *Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Полухин А.А., Костылева А.В., Хлебопашев П.В., Соловьев Д.М., Жаданова П.Д.* Горизонтальная тонкая структура течения речных вод в дельте Волги по спутниковым данным высокого пространственного разрешения // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 254–267. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-254-267. EDN: ZJZWVT. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
45. *Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Алферьева Я.О., Соловьев Д.М., Жук Е.В.* Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 323–329. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329. EDN: WJNJAW. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
46. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Пространственная и временная изменчивость траекторий естественных нефтестроений на морской поверхности Южного Каспия, выявленная по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 4. С. 263–277. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-263-277. EDN: CFXTBH. (**Scopus Q3, RSCI, РИНЦ**)
47. *Романов А.Н., Хвостов И.В., Рябинин И.В., Тихонов В.В., Шадуйко О.М.* Связь сезонных вариаций радиояркостных температур акватории Карского моря с гидролого-климатическими изменениями в Арктике // *Изв. вузов. Физика*. 2023. № 4. С. 34–47. DOI: 10.17223/00213411/66/4/4. EDN: VMPCRT. (**RSCI, РИНЦ**)
48. *Садовский И.Н., Сазонов Д.С.* Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 6. (в печати) (**Scopus, RSCI, РИНЦ**)
49. *Сазонов Д.С.* Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // *Исслед. Земли из космоса*. 2023. № 5. С. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE. (**Scopus, RSCI, РИНЦ**)
50. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Тепловая помеха при регистрации турбулентных пульсаций давления на поверхности всплывающего устройства // *Акустический журнал*. 2023. Т. 69. № 6, С. 1-6. (**RSCI, РИНЦ**) [переводная версия: Kudashev E.B., Yablonik L.R. Thermal interference during registration of turbulent pressure fluctuations on the surface of a floating device // *Acoustical Physics*. 2023. V. 69. No. 6. P. 817-822. DOI: 10.31857/S0320791923600713 (**Web of Sciences-Q4; Scopus-Q2**)]
51. *Онищенко О.Г., Артеха С.Н., Фейгин Ф.З., Астафьева Н.М.* Модель генерации ограниченного в пространстве вихря в стратифицированной неустойчивой атмосфере // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2023. Т. 63. № 4. С. 511–519. DOI: 10.31857/S0016794023600047 (**RSCI, РИНЦ**) [переводная версия: Onishchenko O.G., Artekha S.N., Feygin F.Z., Astafieva N.M. Generation model of a spatially limited vortex in a stratified unstable atmosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023. V. 63. No. 4. P. 464–472. DOI: 10.1134/S0016793222600576 (**Web of Sciences-Q4; Scopus-Q3**)]

- 52.** *Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Михайлов М.В., Шерстюков Б.Г.* Космические регуляторы климата Земли 3 // *Астрономический вестник*. 2023. Т. 57. № 6. С. 521-531. DOI: 10.31857/S0320930X23060014, EDN: DBABWW. **(SCOPUS)**