

На правах рукописи

Гулиев Аловсат Шура оглы

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Guliyev', is written on a white rectangular background.

Разработка методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений
шельфовой зоны (на примере азербайджанского сектора Каспийского моря)

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Хлебникова Татьяна Александровна.

Официальные оппоненты:

Беленко Виктор Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры космического мониторинга и экологии;

Купцова Олеся Витальевна, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сахалинский государственный университет», доцент кафедры безопасности жизнедеятельности.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (г. Хабаровск).

Защита диссертации состоится 29 октября 2024 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/guliev-alovsat/>

Автореферат разослан 22 августа 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 17.06.2024. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 75.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия растет тенденция переориентации ключевых сфер экономики на альтернативные углеводородные источники энергии. Несмотря на это, нефть и нефтепродукты играют ключевую роль в мировой экономике. Это обуславливает необходимость техногенного мониторинга и оценки состояния участков разработок нефти на шельфе, направленных на регулирование процессов и явлений, влияющих на окружающую среду. При мониторинге и оценке состояния месторождений нефти имеет место значительное число потенциально существующих неопределенностей классов объектов, более 30 % которых возникают впервые.

Источниками такого рода неопределенностей (дефектов) являются изменение физико-химических характеристик, протекающих в водных бассейнах, вызванные факторами естественного, природного и антропогенного характера, технические и программно-аппаратные сбои сенсоров, средств контроля исследуемой поверхности и ошибки, обусловленные человеческим фактором. Существующие системы обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из разных спутниковых датчиков обладают удовлетворительными способностями обнаружения известных неопределенностей пикселей. При этом они не всегда способны обнаруживать ранее неизвестные неопределенности классов объектов в данных аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны.

Эти обстоятельства приводят к необходимости совершенствования вероятностных и статистических подходов описания объектов и явлений, происходящих на водной поверхности в местах добычи нефти.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации яркостных характеристик совмещенных изображений, состава и количества измеряемых параметров, характеризующих состояние морской поверхности, а также математического обеспечения, предназначенного для обработки поступающей информации. Это позволит обнаружить и выполнить картографирование загрязненных участков, на которых происходят просачивание природной нефти и разливы при ее

добыче, а также при эксплуатации шельфовых участков, что приводит к технологическим выбросам нефти и нефтепродуктов в окружающую среду.

В связи с этим разработка методики аэрокосмического мониторинга участков шельфовой зоны, загрязненной добываемой нефтью и нефтепродуктами, является актуальной научно-технической задачей. Тем самым решается важная прикладная задача, связанная с безопасной эксплуатацией месторождений нефти для целей народного хозяйства Республики Азербайджан (на примере акватории нефтепромысла Нефтяные Камни).

Степень разработанности темы. Разработкой способов и методик выявления неопределенности значений в эмпирических данных, выявления участков нефтегазовых загрязнений и их картографирования занимались ведущие ученые из стран ближнего и дальнего зарубежья, такие как Беленко В. В., Брынъ М. Я., Гук А. П., Гаусс К. Ф., Журкин И. Г., Заруцкий И. П., Иванов А. У., Карпик А. П., Колмогоров Н. В., Комиссаров А. В., Копылов В. Н., Лупян Е. А., Малинников В. А., Мелкий В. А., Пяткин В. П., Пирсон К., Романовский В. И., Чебышев П. Л., Шаповалов Д. А., Фишер Р. Д., Юсупов Р. М., Чибуничев А. Г., Чочиа П. А., Госсет У. С. (Стьюдент), Brekke С., Espedal Н., Kubat М., Lee J. S., Solberg А. Н. S, Topouzelis К. и др.

Этими учеными опубликованы научные статьи в области тематического дешифрирования аэрокосмической информации применительно к задачам наук о Земле. Разработаны эмпирические, статистические параметрические, непараметрические математические модели и методики для выявления неопределенности класса. Разработанные теоретические модели являются основой для решения задач по поиску неопределенности класса пикселей изображений ДЗЗ.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны на примере азербайджанского сектора Каспийского моря (район нефтепромысла Нефтяные Камни), которая позволяет выявить места нефтяных загрязнений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– выполнить информационно-аналитический обзор современных космических средств, используемых для мониторинга, и технологий автоматизированного де-

шифрования материалов ДЗЗ, позволяющих определять границы нефтяных загрязнений в шельфовых акваториях и физические характеристики водной поверхности зон разработок нефти;

– разработать способ автоматической классификации исследуемых классов объектов по совмещенным разновременным многозональным оптическим и радиолокационным изображениям для распознавания и определения загрязненных участков;

– усовершенствовать алгоритм целостного многомасштабного обучения и тестирования автоматического обнаружения границ нефтяных разливов на поверхности моря с помощью нейронной сети ResNet-10 (Residual neural network) по оптико-электронным и радиолокационным спутниковым изображениям;

– разработать методику аэрокосмического мониторинга границ нефтяных загрязнений шельфовой зоны с использованием современных систем анализа данных ДЗЗ (ENVI (Harris Geospatial), ERDAS Imagine (Hexagon Geospatial), SNAP (Sentinels Application) и пакета прикладных программ Matlab;

– выполнить адаптацию разработанной методики аэрокосмического мониторинга оценки нефтяных загрязнений шельфовой зоны на реальных производственных материалах района нефтепромысла Нефтяные Камни Каспийского моря.

Объектом диссертационного исследования является неоднородная водная поверхность шельфовой акватории в районе нефтепромысла Нефтяные Камни Каспийского моря.

Предметом исследования является методика аэрокосмического мониторинга состояния участков добычи на шельфовой акватории.

Научная новизна заключается в следующем:

– разработан способ автоматической классификации исследуемых классов объектов по совмещенным разновременным многозональным оптическим и радиолокационным изображениям, позволяющий повысить достоверность обнаружения границ зон нефтяных загрязнений за счет устранения неоднородности спектрального фона изображений;

– усовершенствован алгоритм целостного многомасштабного обучения и тестирования автоматического обнаружения нефтяных разливов на поверхности моря

нейронной сетью ResNet-10 (Residual neural network) по оптико-электронным и радиолокационным спутниковым изображениям, позволяющие осуществлять эффективное обнаружение границ загрязненности нефтью за счет контроля скрытых слоев;

– разработана методика космического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны с использованием современных систем анализа данных ДЗЗ: ENVI (Harris Geospatial), ERDAS Imagine (Hexagon Geospatial), SNAP Desktop (Sentinel Application) и пакета прикладных программ Matlab, позволяющая определять границы нефтяных загрязнений, а также динамику поверхностного морского течения и береговые затопления.

Теоретическая значимость исследований заключается в разработке методики анализа и интерпретации совмещенных изображений среднего и высокого разрешения, полученных от различных сенсорных датчиков космических аппаратов с длинными временными рядами для оценки границ нефтяных загрязнений и состояния мест разработок нефти на шельфовой зоне.

Практическая значимость заключается в повышении точности и достоверности определения и картографирования границ участков разработок нефти для оценки состояния мест шельфовой акватории и прогнозирования динамики распространения нефтяных загрязнений.

Методология и методы исследований включают в себя проведение теоретических исследований с использованием теории вероятности, математической статистики, математического моделирования и системного анализа полевых данных, а также теории ошибок измерений и методов реализации результатов измерений в производственных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

– способ автоматической классификации исследуемых классов объектов по совмещенным разновременным многозональным оптическим и радиолокационным изображениям, позволяющий повысить достоверность обнаружения границ нефтяных загрязнений за счет устранения неоднородности спектрального фона изображений;

– алгоритм целостного многомасштабного обучения и тестирования автоматического обнаружения границ нефтяных разливов на поверхности моря нейронной сетью ResNet-10 (Residual neural network) по оптико-электронным и радиолокационным спутниковым изображениям, обеспечивающий достоверное обнаружение границ загрязненности нефтью за счет контроля скрытых слоев;

– методика аэрокосмического мониторинга шельфовой зоны с использованием современных систем анализа данных ДЗЗ: ENVI (Harris Geospatial), ERDAS Imagine (Hexagon Geospatial), SNAP Desktop (Sentinel Application) и пакета прикладных программ Matlab, позволяющая определять границы нефтяных загрязнений с учетом специфики шельфовой зоны, динамику поверхностного морского течения и береговые затопления.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует областям исследования: 5 – Исследования методами ДЗЗ выбросов в окружающую среду (вода, воздух, почва, растительность) антропогенных и природных загрязняющих веществ, включая эмиссию парниковых газов в воздушную среду; 13 – Теория, методы и технологии создания трехмерных моделей объектов земной поверхности, инженерных и других объектов, на основе различных видов съемки (оптическая, радиолокационная, лазерно-локационная и др.) паспорта научной специальности 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Разработанная методика аэрокосмического мониторинга оценки нефтяных загрязнений шельфовой зоны применена и проверена на реальных объектах района нефтепромысла Нефтяные Камни (экономическая зона азербайджанского сектора Каспийского моря). Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на, XVII, XVIII, XIX Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», (г. Новосибирск, 2021–2023 гг.), на Второй национальной научно-практической конференции с международным участием Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Технического нефтегазового института

СахГУ, Южно-Сахалинск, Россия, в рамках 23-й международной конференции и выставки «НЕФТЬ и ГАЗ САХАЛИНА 2019» (г. Южно-Сахалинск, 2019 г.).

Публикации по теме диссертации. Результаты научных исследований представлены в 10 научных статьях, 4 из которых – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 177 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования, содержит 8 таблиц, 29 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту, приведено обоснование теоретической и практической значимости исследования, приведены сведения о достоверности и апробации результатов исследований, структура диссертации.

В первом разделе диссертации приведены сведения об исследуемой области – нефтяном месторождении Нефтяные Камни, расположенном на шельфе Каспийского моря. Дана оценка масштабов нефтяного прессинга, основных источников, причин и последствий попадания нефти на шельфовую территорию Каспийского моря. На основании обзора источников показано, что в Республике Азербайджан проблема загрязнения гидросферы нефтепродуктами продолжается и наиболее остро проявляется в Каспийском море.

Рассмотрены существующие методы обнаружения и определения границ участков загрязнений. Установлено, что имеет место двойственная интерпретация определения границ участков, загрязненных нефтью, которая возникает из-за раз-

ных процессов не только на морской поверхности, но и на глубине. Рассмотрены виды дешифрирования, наиболее часто приводимые в литературе: визуальное дешифрирование, интерактивное, автоматизированное, автоматическое.

При дешифрировании объектов по материалам ДЗЗ выделяют два типа задач:

- распределение объектов, изображенных на снимке по определенным классам;
- определение численных значений характеристик объектов и оценка точности.

Решение задач первого типа основано на теории распознавания образов, второго типа – на основе теории статистической оценки. Теория распознавания образов включает понятие классификации, являющееся одной из основных задач при обработке материалов ДЗЗ для цели дешифрирования.

В настоящее время существует много способов классификации данных ДЗЗ. Результаты выполненного анализа показали, что недостаточно изучены вопросы комплексного использования спутниковых съемочных систем ДЗЗ нового поколения, такие как многоспутниковые орбитальные группировки систем аэрокосмического мониторинга Sentinel, предоставляющие данные в режиме реального времени с определенной частотой обновления.

Анализ литературных источников показал, что системы обработки ДЗЗ, включающие существующие методы анализа, статичны и ориентированы на поиск известных, точно описываемых объектов (явлений) состояний открытых морей или шельфов, при этом часто не определяют ранее неизвестные неопределенности классов объектов в ДЗЗ. Последнее делает их применение малоэффективным.

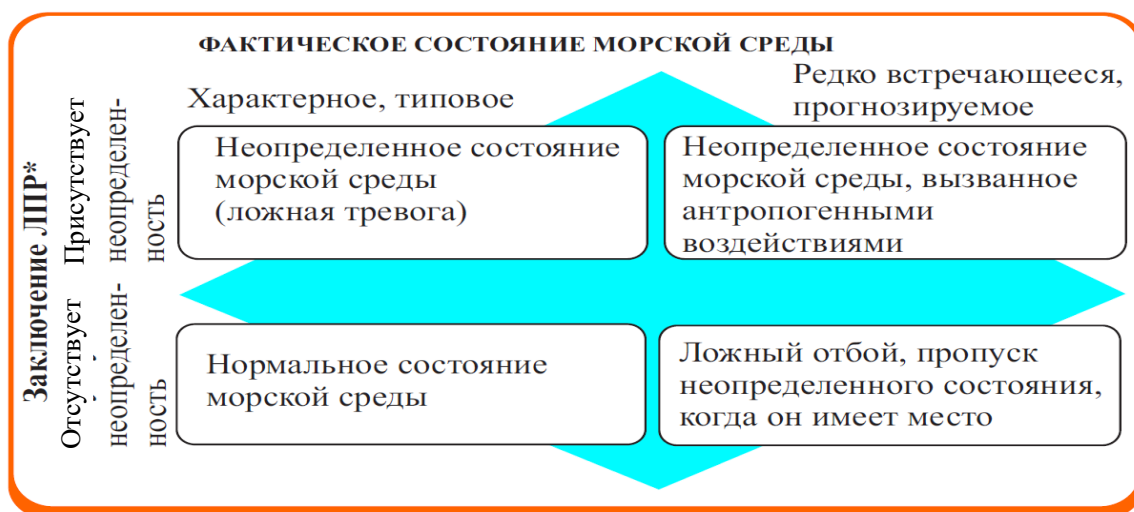
Основной недостаток существующих подходов – определение органических нормируемых показателей только углеводородных соединений и игнорирование продуктов трансформации нефти. Кроме того, практически не рассматриваются особенности растворения этих соединений в водной среде, служащей основным транспортом поллютантов, и сопредельные среды прилегающей территории.

Анализ литературных источников показал, что интеграция многозональных снимков и радиолокационных изображений с синтезированной апертурой при де-

шифровании объектов в шельфовых зонах может существенно уменьшить неопределенность, возникающую из-за окружающего света, солнечного блеска на поверхности воды, а также малой глубины. В этой связи, а также в связи с тем, что стали доступными данные Европейского космического агентства (ЕКА), в рамках проекта, направленного на создание автономной многоуровневой системы наблюдения за экологической обстановкой на Земле, в исследованиях использовались снимки со спутников съемочных систем Sentinel-1A и Sentinel-2A.

Во втором разделе диссертации на основании анализа литературных источников, экспериментальных работ по производственным материалам ДЗЗ определено, что данные дистанционного зондирования являются главным источником своевременных сведений для обнаружения, картографирования и ликвидации нефтяных загрязнений в шельфовых акваториях.

Автором предложена формализованная структура задачи обнаружения неопределенностей классов объектов в данных аэрокосмического мониторинга (рисунок 1), позволяющая определять значение средней важности признаков в районе исследования.



* ЛПР – лицо, принимающее решение

Рисунок 1 – Формализованная структура обнаружения неопределенностей в данных аэрокосмического мониторинга

Установлено, что для выявления и классификации разливов нефти использование данных одного датчика малоэффективно. Для решения задач обнаружения пленок нефти на поверхности воды, определения характеристик, типов разливов нефти, их картографирования предложено применение мультиспектральных и радиолокационных снимков и дополнительных материалов. К последним относятся: ветровые карты, направления течения, физико-химические оценки водного бассейна в исследуемом районе, данные из наземных систем датчиков, устанавливаемых на инженерных объектах, и другие данные, интерпретируемые как графические изображения.

Технологическая схема методики космического мониторинга разливов нефти на водной поверхности состоит из нескольких этапов (рисунок 2). Схема этапов преобразования данных в пространственно-распределенную базу топографической информации представлена на рисунке 3.

Предварительная обработка исходных данных. В качестве исходных данных используются: разновременные космические снимки, аналоговые изображения карт, морские топографические карты, цифровые сейсмические карты и полевые данные визуального наблюдения на территории исследования. При этом используются растровые изображения карт и снимки, полученные с разных точек, но на одну и ту же дату, что позволяет получать далее совмещенные изображения.

Исходные цифровые и аналоговые материалы преобразуются в файлы соответствующего формата для формирования пространственно-распределенной базы топографической информации (БТИ). Далее по радиолокационным снимкам рассчитываются распределения коэффициентов обратного рассеяния, а также формируются псевдоцветные изображения для всего ряда радиолокационных изображений.

Методы калибровки, фильтрации спекл-шумов и т. д. являются стандартными при обработке радиолокационных данных. Псевдоцветное изображение – это снимок, полученный из синтеза поляризационных каналов радиолокационного изображения. Формирование таких изображений может выполняться различными спосо-

бами, исходя из числа поляризации и частоты временного ряда, особенностей исследований.

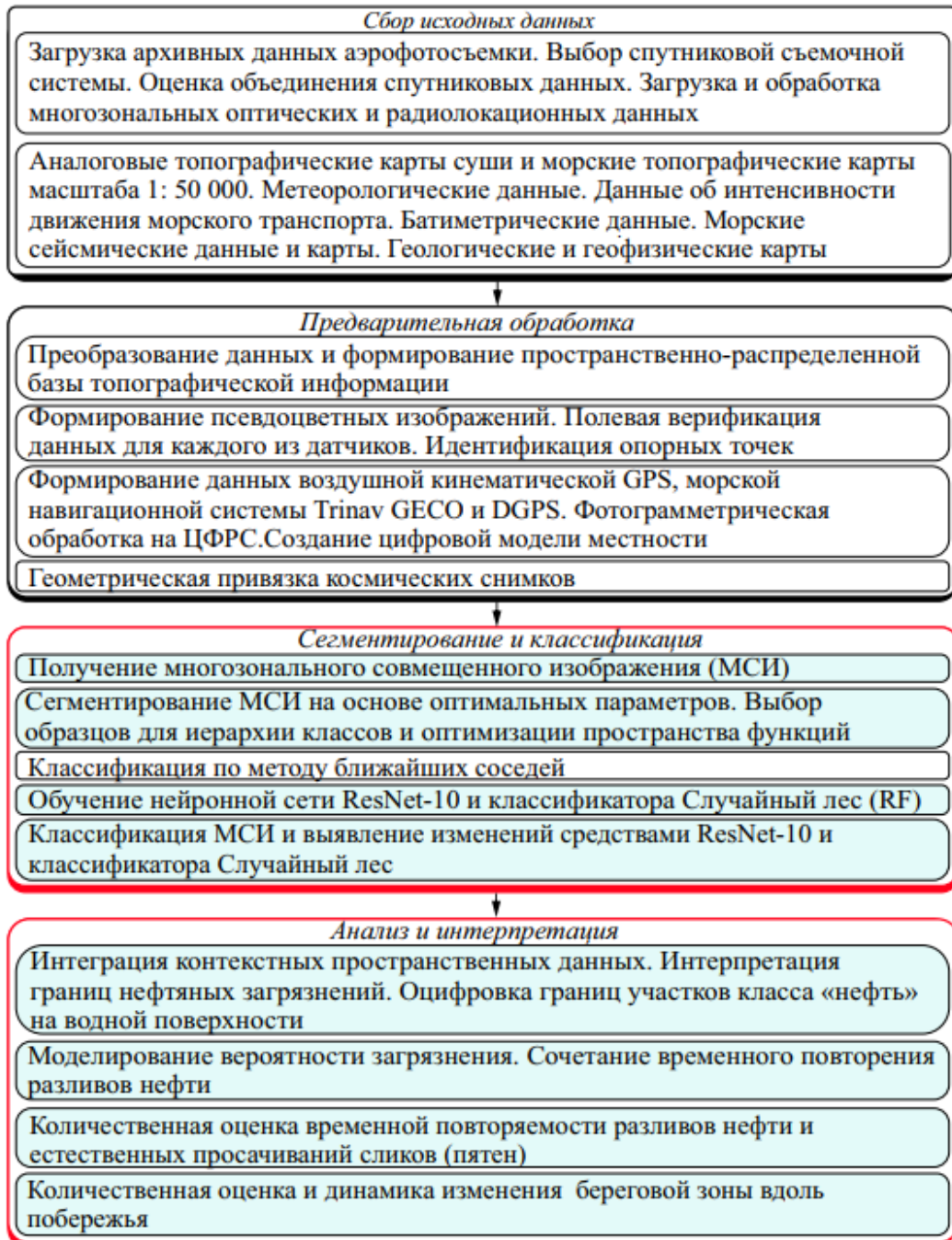


Рисунок 2 – Технологическая схема методики аэрокосмического мониторинга оценки нефтяных загрязнений шельфовой зоны

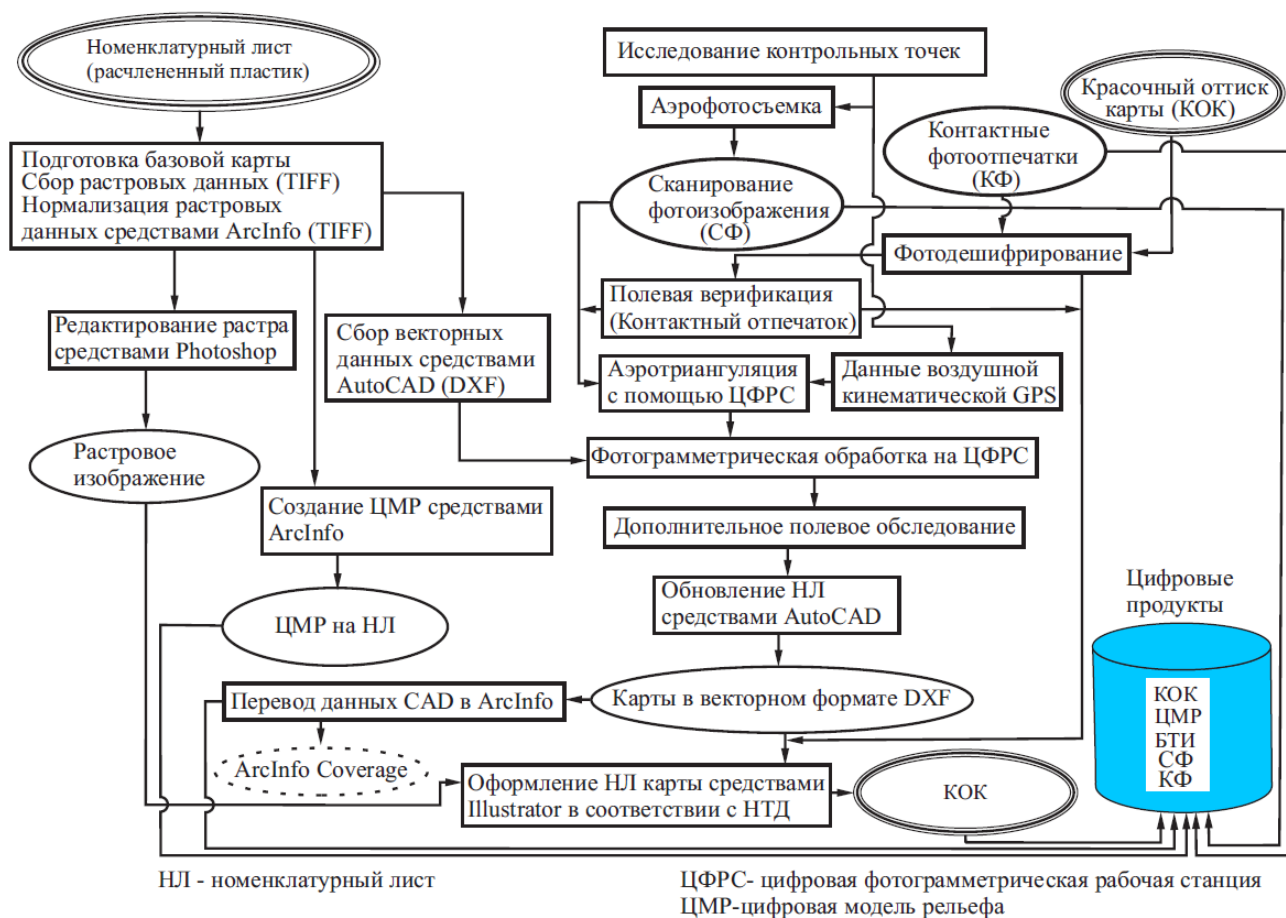


Рисунок 3 – Схема преобразования данных
в пространственно-распределенную базу топографической информации

В этой связи автором предложено создание псевдоцветных изображений, основанных на амплитуде радиолокационных изображений.

Предложенный вариант формирования псевдоцветного радиолокационного снимка может быть использован как для визуального, так и автоматического дешифрирования. Для автоматического дешифрирования используются радиолокационные изображения, прошедшие этап радиометрической калибровки, т. е. изображения, которые можно использовать для измерения значений коэффициентов обратного рассеяния и классификации объектов на основе по их значениям.

При проведении исследований использованы исходные радиолокационные изображения (РЛ), дисперсии карты ветрового поля, набор изображений, включаю-

щий многоканальные изображения с дополнительными данными. Также использовались данные глобальной нормализации, позволяющие осуществлять определение двойников и сложных форм нефтяных разливов в различных масштабах.

Отметим, что снимок, предназначенный для автоматического дешифрирования, может иметь более двух каналов, чем изображения для визуального дешифрирования (например, в случае RGB-синтеза используется три канала). Для обработки Sentinel-1A предложена комбинация двухполярный поляризации – R-ГГ, G-ГВ, В-ГГ/ГВ. Изображение в голубом канале подчеркивает различие уровней обратной поляризации в согласованных и перекрестных поляризациях. Схема создания псевдоцветного амплитудного РЛ изображения для визуального дешифрирования представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема формирования псевдоцветного амплитудного РЛ изображения

Координаты и высоты опорных и контрольных точек для сгущения опорной сети получают полевыми методами. Фотограмметрическое сгущение плановых и высотных точек осуществляется при построении и уравнивании блочной или маршрутной фотограмметрических сетей.

Результаты фототриангуляции используются для геометрического преобразования космических снимков, конвертации в соответствующий формат и формирования пространственно-распределенной базы изображений.

Анализируя преобразованные пары оптических и радиолокационных изображений, из БТИ выбираются три наиболее информативных канала и один диапазон радиолокационного изображения путем комбинации. При успешном выполнении этих операций в системах обработки изображений (в данных исследованиях ис-

пользована система ERDAS IMAGINE) получают многозональное совмещенное (слитое) изображение (МСИ).

Совмещенное изображение позволяет обнаружить участки разлива нефти за счет повышения разрешения синтезированного многозонального изображения и уменьшения искажений цветопередачи (рисунок 5). После получения совмещенного изображения интерпретация по выявлению изменений выполняется средствами нейронной сети ResNet-10. Процесс подготовки и обучения – это предъявление сетевой выборке примеров обучения. Каждый шаблон подается на вход сети, затем проходит обработку внутри структуры нейронной сети (НС), и вычисляется выходной сигнал сети, который сравнивается с соответствующим значением целевого вектора, представляющего собой требуемый выход сети.

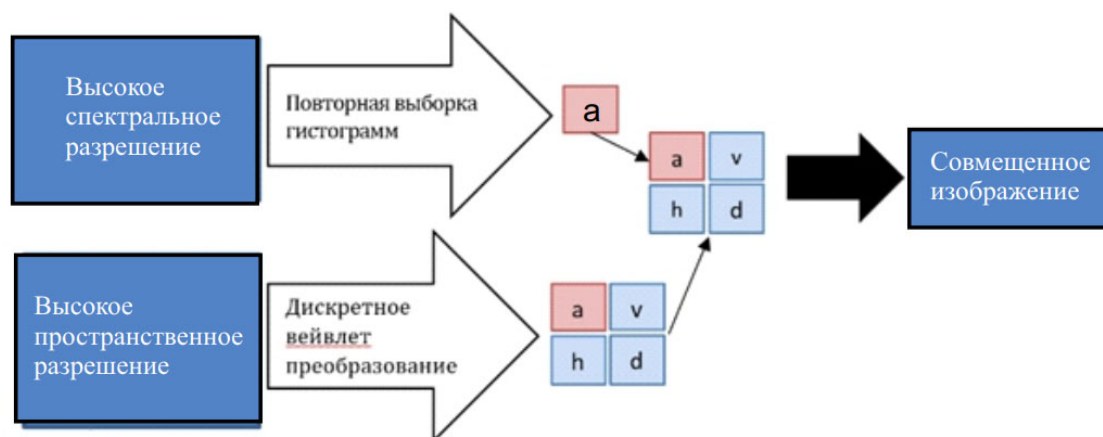


Рисунок 5 – Изображение процесса получения многозонального совмещенного изображения

Предложена методика обучения целостного многомасштабного обучения, а также тестирование автоматического обнаружения нефтеразлива на водной поверхности моря нейронной сетью ResNet-10. Выбранная архитектура сети анализирует все снимки и определяет базовые признаки идентификации, из которых определяются высокоуровневые признаки идентификации.

Анализ результатов и оценка качества распознавания участков загрязнений нефтью выполнялись путем выбора поднабора из исходной выборки, не участвовавшего в обучении. Обнаруженные контуры загрязнения нефти сравнивались с аналогом, полученным алгоритмами традиционных методов (к ближайшего соседа, средние значение областей к ближайшего соседа, метод максимального правдоподобия) обнаружения областей, загрязненных нефтью.

На основе одного из алгоритмов анализа изображений – сверточных нейронных сетей архитектуры глубокого контролируемого метода – для ResNet-10 предложены усовершенствования, заключающиеся во введении дополнительных подсказок в архитектуру сети, способствующего улучшению качества дешифрирования. То есть, после ввода данных в сеть ResNet-10 эта сеть выделяет функции разного масштаба в четыре этапа, которые являются свертками каждой оставшейся части.

Автором предложена архитектура сети для реализации алгоритма, метода целостного многомасштабного обучения и тестирования автоматического обнаружения нефтяных разливов на поверхности моря нейронной сетью ResNet-10 по оптико-электронным и радиолокационным спутниковым изображениям. На входе сети задается цветное интегрированное многозональное изображение одинакового разрешения пространства до 10 м, полученное при сочетании 13 диапазонов спектров Sentinel-2A оптических и Sentinel-1A радиолокационных изображений. По результатам интерпретации обновляется БТИ.

В третьем разделе диссертации приведены результаты экспериментальных работ по исследованию разработанной методики. В качестве исходных данных использованы реальные производственные материалы: аналоговые топографические карты суши, морские карты масштаба 1 : 50 000, цифровые сейсмические данные, геологические и геофизические карты, батиметрические данные, полевые данные визуального наблюдения на участке исследования, архивные цифровые материалы аэрофотосъемки масштаба 1 : 40 000, разновременные многозональные оптические снимки, полученные со спутника Sentinel-2A, радиолокационные изображения, по-

лученные со спутника Sentinel-1A. Для преобразования исходных материалов и формирования БТИ выполнялось: сканирование аналоговых карт, векторизация растровых изображений, конвертирование в соответствующие форматы. По архивным материалам аэрофотосъемки выполнено фотограмметрическое сгущение сети опорных точек.

Полученные СКП плановых координат на опорных и контрольных точках для каждого блока имели значения от 2,0 до 3,7 м, а СКП высот находились в пределах от 1,8 до 3,6 м. Эти значения не превышали допустимых значений НТД, регламентирующего выполнение сгущения фотограмметрической сети, создание цифрового ортофотоплана масштаба 1 : 50 000.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) создавались в виде регулярных сеток GRID с шагом 10 м в программном обеспечении SOCET SET. Качество полученных ЦМР оценивалось по двум позициям: полнота и точность по высоте.

Для обучения и оценки результатов работы сети использовались пары оптических и радиолокационных изображений (15 пар снимков Sentinel-2A и Sentinel-1A). Трансформирование изображений осуществлялось средствами пакета MapInfo Pro 2021 г. Командами «Register» и «Rectify» создана геопривязанная модель растровых изображений в заданной системе координат.

В исследованиях обозначены классы классификации: нефть, отсутствие нефти. Для классификации «разлив при эксплуатации» использован классификатор «Случайный лес» (Random Forest, RF). Количество применяемых в RF классификаторе деревьев составило 500. В исследованиях для сравнения результатов интерпретации изображений дополнительно участвовали районы шельфовой зоны «Гошадаш» (ГД) и «Нариманов нефть» (НН). Обработка трех районов (НК, ГД, НН) проведена на 15 парах изображений многозональных космических снимков Sentinel-2A и радиолокационных изображений Sentinel-1A.

На изображении был создан комплект из 5 000 случайных пикселей и определено 25 000 пикселей (т. е. 23 570 пикселей «без разлива при эксплуатации»; 1 430 пикселей с «разливом при эксплуатации»). Проверка сходимости была проведена с использованием матрицы несоответствий.

При анализе результатов интерпретации выбраны десять самых важных признаков текстур (рисунок 6).

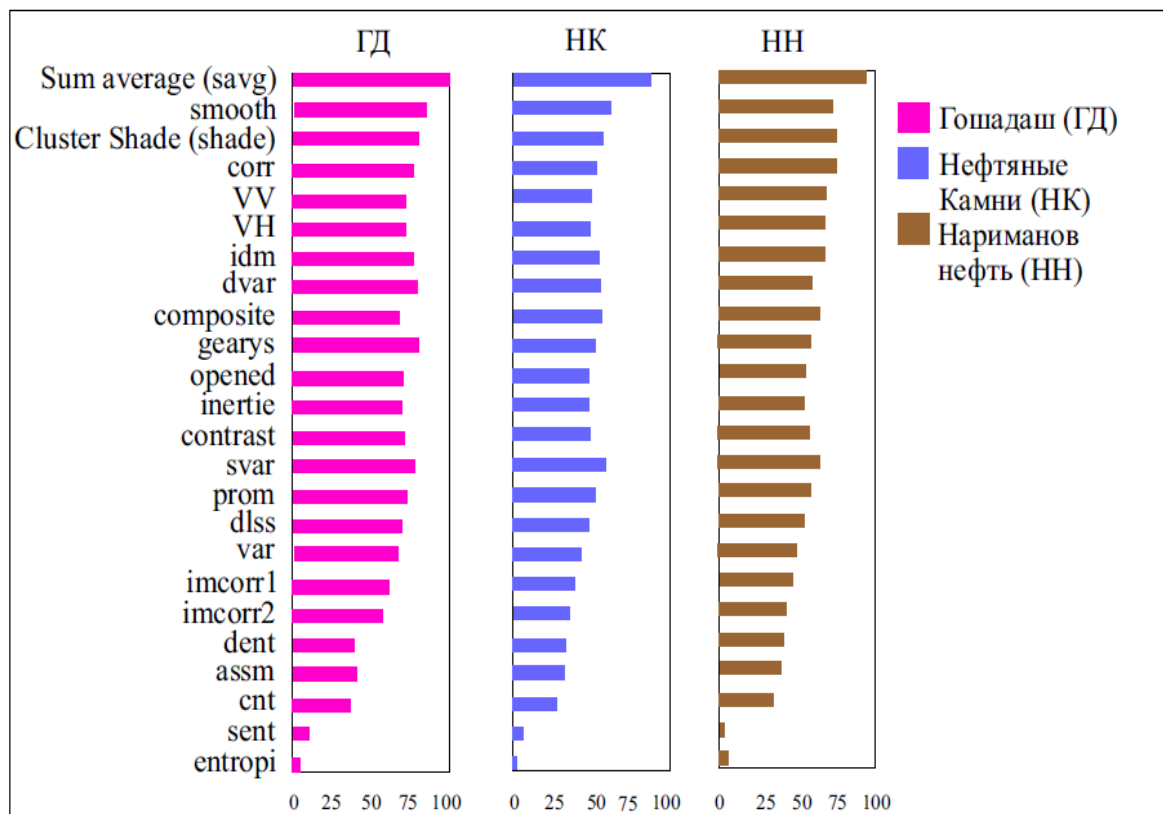


Рисунок 6 – Результаты обработки (средняя важность признаков) трех районов шельфовой зоны

На рисунке алгоритмы Savg, Smoth, Shade и Corr вошли в первую четверку по важности. Спектральные характеристики VV и VH занимают пятое и шестое и их композиция разной поляризация (Composite) девятое места – лучшие в рейтинге. Для трех изображений наиболее заметной характеристикой была средняя сумма (Savg). Энтропия была наихудшей с точки зрения важности.

Район «Нефтяные Камни» характеризуется хорошими показателями в отношении других двух. За исключением Savg, другие признаки не имели достаточного оптимального значения (см. рисунок 6). Значительные отклонения класса «разлив при эксплуатации» получены для районов «Госадаш» и «Нариманов Нефть» и

«нет разлива» для трех районов ГД, НК, НН соответственно. В таблице 1 приведена сводная информация (среднее отклонение, стандартное отклонение) для оценки определения участков разливов нефти по местоположению. Вне зависимости от количества используемых признаков, в районах ГД и НН показано большее значение точности – общее значение текстурного признака с $X = 0,9969$; $\sigma = 0,0003$ и $X = 0,9433$; $\sigma = 0,0032$.

Таблица 1 – Результаты обработки трех районов шельфовой зоны

Район исследования	Статистика	Значение текстурного признака совпадения		
		общее значение	существует разлив нефти	отсутствует разлив нефти
ГД	Среднее отклонение (спектрального вектора X)	0,9969	0,9981	0,9963
	Стандартное отклонение (σ)	0,0003	0,0001	0,0006
НК	Среднее отклонение (спектрального вектора X)	0,9258	0,9422	0,9385
	Стандартное отклонение (σ)	0,0038	0,0018	0,0024
НН	Среднее отклонение (спектрального вектора X)	0,9433	0,9651	0,9538
	Стандартное отклонение (σ)	0,0032	0,0036	0,0007

Результаты достоверности распознавания текстур разливов нефти по пяти алгоритмам приведены в таблице 2. В первом случае использованы три версии классификатора (Nearest Neighbour Classification) по правилам метода ближайшего соседа k-NN и k-9NN, что означает, что для классификации взяты один и девять соседей. Во втором случае использовались средние значения областей обучения (MDM). В третьем случае использовался алгоритм оценки максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Estimation) значений параметров модели (ML). В четвертом случае использовался метод случайного леса (Random Forest) с использованием Google Earth Engine (GEE).

Таблица 2 – Результаты обработки по пяти алгоритмам

Датчик/ Sensor	Данные	Классификация ближайших соседей			ML, %	RF, %	ResNet-10, %
		Кn- 1NN, %	Кn- 9NN, %	MDM, %			
Sentinel-1A	Совмещенное изображение	76,4	67,2	71,8	54,4	83,2	96,5
Sentinel-2A							

Наилучшее значение было получено при использовании алгоритма классификации автоматического обнаружения разливов нефти на поверхности воды средствами нейронной сети ResNet-10. По результатам определения областей нефтяных загрязнений обновляется содержание БТИ (НЛ карты, цифровая модель местности, ортофотоплан). По обновленным материалам БТИ оценивается состояние шельфовой акватории и прогнозируется динамика распространения нефтяных загрязнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований достигнута поставленная цель – разработана методика аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны (на примере азербайджанского сектора Каспийского моря) и получены следующие основные результаты:

– выполнен информационно-аналитический обзор по вопросам современных съемочных спутниковых систем и методов дешифрирования материалов ДЗЗ и требований к спутниковым аэрокосмическим данным, а также гидрометеорологическим условиям морской поверхности, на основании которых сделан вывод о необходимости разработки методики аэрокосмического мониторинга оценки нефтяных загрязнений шельфовой зоны;

– разработан способ автоматической классификации классов объектов по совмещенным разновременным многозональным оптическим и радиолокационным изображениям для оценки достоверности распознавания границ нефтяных загрязнений на территориях разработок нефти; определены требования для построения и ориентирования модели из изображений, полученных разными космическими системами в заданной системе координат, и высот первого эталонного цифрового изображения. Разработанный способ позволяет определить границы загрязнений нефтью, динамику поверхностного морского течения и береговые затопления;

– усовершенствован алгоритм целостного многомасштабного обучения и тестирования автоматического обнаружения границ нефтяных разливов на поверхности моря с помощью нейронной сети ResNet-10 по оптико-электронным и радиолокационным спутниковым изображениям, позволяющий повысить достоверность обнаружения границ зон нефтяных загрязнений в шельфовых акваториях морей для принятия управленческих решений в нештатных ситуациях, возникающих при аварийных разливах нефтепродуктов на морской поверхности;

– разработана методика аэрокосмического мониторинга границ нефтяных загрязнений шельфовой зоны, включающая разработанный способ автоматической

классификации исследуемых классов объектов по совмещенным разновременным многозональным оптическим и радиолокационным изображениям и усовершенствованный алгоритм целостного многомасштабного обучения и тестирования автоматического обнаружения границ нефтяных разливов на поверхности моря с помощью нейронной сети ResNet-10 с использованием современных систем анализа данных ДЗЗ (ENVI, ERDAS Imagine, SNAP) и пакета прикладных программ Matlab;

– выполнена апробация разработанной методики аэрокосмического мониторинга границ нефтяных загрязнений шельфовой зоны на реальных производственных материалах района нефтепромысла Нефтяные Камни Каспийского моря, которая показала высокую эффективность выполненных исследований.

Результаты исследований рекомендованы к использованию при обработке материалов космических съемок для поиска потенциально уязвимых районов шельфовой зоны Каспийского моря.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются исследования для ситуации, полностью основанной на обучении сегментации текстур с использованием нейронной 2D-сети с длинной кратковременной сетью памяти (LSTM).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Гулиев, А. Ш. Выявление мест нефтезагрязнений шельфовой зоны по материалам космических съемок (на примере акватории Нефтяных Камней (Каспий)) / А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 52–64. – DOI 10.33764/2411– 52–1759– 2019–24–3–52–64.

2 Гулиев, А. Ш. Обнаружение и картирование нефтяных slickов в море комбинацией различных источников данных дистанционного зондирования Земли / А. Ш. Гулиев. – Текст : непосредственный // Вестник Заб.ГУ – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 19–30. –DOI 10.21209/2227-9245-2022-28-1-19-30.

3 Гулиев, А. Ш. Исследование возможностей обработки радиолокационных и мультиспектральных космических изображений подстилающей поверхности / А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 102–114. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114.

4 Гулиев, А. Ш. Анализ изменений природно-антропогенной трансформации береговой линии азербайджанского сектора Каспийского моря / А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 85–93. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-85-93.

5 Гулиев, А. Ш. Флуктуационные характеристики радиолокационных изображений подстилающей поверхности / А. Ш. Гулиев. – Текст : непосредственный // Научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов, посвященной 55-летию Азербайджанского технического университета Баку. – 2005. – С. 143–145.

6 Гулиев, А. Ш. Методы аэрокосмического мониторинга для оценки экологического состояния шельфовых объектов нефтегазодобычи / А. Ш. Гулиев. – Текст : непосредственный // Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения: материалы Второй национальной научно-практической конференции с международным участием (Южно-Сахалинск, 24–26 сентября 2019 г.) / Ред. Л. М. Богомолов, В. А. Мелкий. – Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 2019. – С. 4–11.

7 Гусейнли, Ш. А. Системно-аэрокосмические методы исследования нефтяного загрязнения водной среды / Ш. А. Гусейнли, А. Ш. Гулиев. – Текст : непосредственный // Февральские чтения-2019 «Творческий потенциал молодежи в решении авиакосмических проблем» : материалы IV Международной научно-практической молодежной конференции. – Баку, 2019. – С. 83–85.

8 Гулиев, А. Ш. Многомерная статистическая модель для обнаружения мест нефтезагрязнений по материалам космических съемок / А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мо-

нитинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 11–16. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-11-16.

9 Гулиев, А. Ш. Методы совместной обработки комплексных радиолокационных интерферограмм и мультиспектральных оптических снимков в условиях высокой временной декорреляции / А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 3–9. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-4-3-9.

10 Гулиев, А. Ш. Исследование экологической чувствительности западного побережья Каспийского моря к потенциальным выбросам по материалам космических съемок / А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Междунар. науч. конгр., г., Новосибирск: сборник материалов в 8 т. Т. 4.: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГИТ, 2023. №1. – С. 171–177.