

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет транспорта (МИИТ)»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

Железнов Максим Максимович



Методы повышения безопасности движения и предупреждения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте с использованием средств аэрокосмического мониторинга

05.26.02 - Безопасность в чрезвычайных  
ситуациях (транспорт)

Диссертация на соискание ученой степени доктора  
технических наук

Научный консультант  
доктор технических наук, профессор  
Пономарев Валентин Михайлович

Москва – 2017

## Оглавление

Введение .....	5
1 Анализ природно-техногенных чрезвычайных ситуаций и систем космического мониторинга .....	16
1.1 Анализ чрезвычайных ситуаций по степени воздействия на железнодорожную инфраструктуру. Ключевые проблемы мониторинга.....	16
1.2 Зарубежный опыт разработки спутниковых систем мониторинга регионов с высоким риском возникновения чрезвычайных ситуаций.....	25
1.3 Оценка территорий пролегания железных дорог России с точки зрения рисков возникновения масштабных природно-техногенных чрезвычайных ситуаций.....	28
1.4 Описание опытного полигона разработки и внедрения спутниковой технологии мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути.....	32
1.5 Космические аппараты дистанционного зондирования Земли для задач мониторинга потенциально-опасных участков пути и возникающих чрезвычайных ситуаций.....	37
1.6 Концептуальные задачи по созданию комплексной системы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути и предупреждению чрезвычайных ситуаций.....	48
2 Концепция аэрокосмического мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути и предотвращения чрезвычайных ситуаций с учетом мировых тенденций технологического развития .....	52
2.1 Тенденции развития железнодорожного транспорта с точки зрения неблагоприятного воздействия на инфраструктуру.....	52
2.2 Эволюция методов и средств мониторинга железнодорожного пути и предупреждения чрезвычайных ситуаций.....	61
2.3 Перспективы развития комплексной оценки состояния железнодорожного пути с учетом новых аэрокосмических средств мониторинга.....	67

2.4 Совершенствование системы информационно-технологического мониторинга железнодорожного пути для предупреждения чрезвычайных ситуаций.....	74
3 Разработка аэрокосмических методов оперативного мониторинга и предотвращения чрезвычайных ситуаций .....	80
3.1 Преимущества аэрокосмических методов дистанционного зондирования при мониторинге железнодорожного пути.....	80
3.2 Методика распознавания и определения геометрических параметров железнодорожного пути.....	82
3.3 Выявление потенциально-опасных объектов на прилегающих к железнодорожному пути территориях по материалам аэрокосмического дистанционного зондирования.....	86
4 Спутниковая технология мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути .....	103
4.1 Методика обработки данных космического радиолокационного мониторинга территорий пролегания потенциально-опасных участков железнодорожного пути.....	103
4.2 Методика построения цифровой модели местности территории пролегания потенциально-опасных участков железнодорожного пути на примере линии Адлер-Туапсе.....	133
4.3 Методика выявления очагов зарождения чрезвычайных ситуаций путем определения деформаций рельефа по материалам спутниковой радиолокационной съемки.....	167
5 Комплексная система мониторинга и предотвращения чрезвычайных ситуаций на полигоне Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги с применением средств глобального космического наблюдения.....	198
6 Мониторинг железнодорожного пути средствами аэрокосмического наблюдения на участках воздействия тяжеловесных поездов с повышенными осевыми нагрузками .....	219
Заключение .....	237
Список сокращений и условных обозначений .....	241

Список литературы .....	242
Приложение – справки о внедрении результатов .....	277

## Введение

### **Актуальность темы исследования.**

Обеспечение устойчивости перевозочного процесса и предотвращение чрезвычайных ситуаций (ЧС) является актуальной задачей для железнодорожного транспорта. ЧС создают серьезные риски техногенного характера для работников железнодорожного транспорта и населения, проживающего на прилегающих территориях. Инновационные технические решения, применяемые для задач мониторинга протяженных участков железнодорожного пути, позволяют достичь максимального интегрированного эффекта для безопасности железнодорожного транспорта.

Возникновение ЧС на железнодорожном транспорте обусловлено рядом природно-техногенных факторов, влияние которых на инфраструктурные объекты со временем не снижается:

- большая часть железных дорог построена и функционирует в сложных природно-климатических условиях (равнинные территории и низменности с преобладанием увлажненных грунтов);

- до 1900 года дороги (до 80% железнодорожной сети) строились по частным рекомендациям, а разработанные позднее нормативы пересматривались более 10 раз;

- повышение интенсивности перевозочного процесса и введение повышенных осевых нагрузок приводили и приводят к необратимым физико-химическим процессам в земляном полотне, которые меняют характер поведения железнодорожного пути в целом.

При этом необходимо отметить непрерывный рост грузонапряженности на сети железных дорог. Средний вес грузового поезда за последние 100 лет вырос с 600 до 4000 т брутто. Среднесетевой рост грузонапряженности за прошедшие 10 лет (период 2006 – 2016 гг.) составил более 11%, а на дорогах Восточного полигона (Западно-Сибирской, Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской,

Дальневосточной), работающих в сложных природно-климатических условиях, более 33%.

Таким образом, актуальность решения проблемы мониторинга железнодорожного пути, а также потенциально-опасных объектов и явлений на прилегающих территориях, определяется необходимостью реализации повышенных требований к безопасности движения (в первую очередь к геометрическим параметрам устройств железнодорожного пути большой протяженности на строящихся и функционирующих грузонапряженных магистралях), предупреждению техногенных катастроф и масштабных негативных последствий природных явлений на железных дорогах.

В то же время интеграция национальных железнодорожных систем в единую мировую транспортную систему требует единого научно-технологического подхода к вопросам мониторинга железнодорожного пути для предупреждения и предотвращения ЧС, унификации методов измерений, форм представления информации и нормативных требований к её полноте и точности, перехода от традиционных технологий сбора информации к инновационным, в том числе космическим.

Также необходимо отметить, что разрабатываемый ОАО «РЖД» инновационный проект «Цифровая железная дорога» ориентирован на интеграцию инновационных технологий в целях повышения безопасности и эффективности железнодорожного транспорта. В рамках реализации проекта аэрокосмические технологии должны стать одним из основных средств сбора оперативной актуальной информации о состоянии инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта.

**Степень разработанности темы исследования.** Для достижения поставленной цели были проанализированы проблемы комплексной безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта, опубликованные в трудах ученых: В.А. Аксёнова, М.Х. Ахтямова, М.М. Гаденина, В.И. Гуменюка, А.М. Замышляева, С.А. Каргопольцева, В.И. Колесникова, В.И. Купаева, Б.А. Левина, В.М. Лисенкова, И.Г. Малыгина, И.В. Мартынюка,

Н.А. Махутова, В.И. Медведева, В.Н. Морозова, А.Ю. Паньчева, В.М. Пономарева, В.Г. Попова, В.А. Пучкова, А.А. Таранцева, Т.С. Титовой, Ю.В. Трофименко, В.П. Феоктистова, В.Н. Филиппова, А.А. Хохлова, М.А. Шевандина, К.П. Шенфельда, С.К. Шойгу и др.

Были изучены труды ученых в области мониторинга состояния железнодорожного пути для предупреждения ЧС: А.Ю. Абдурашитова, Е.С. Ашпиза, Л.С. Блажко, В.М. Богданова, В.М. Бугаенко, В.А. Бучкина, Ю.А. Быкова, А.Г. Гельфгата, Б.Э. Глюзберга, В.М. Ермакова, А.Я. Когана, В.И. Новаковича, В.О. Певзнера, С.П. Першина, Ю.С. Ромена, В.Н. Сазонова, В.А. Явны, М. Роуни (США) и др.

Также были проанализированы труды ведущих ученых по применению спутниковых технологий в задачах мониторинга транспортной инфраструктуры в целях предупреждения и отслеживания ЧС: Г.А. Аванесова, А.С. Василейского, В.М. Бройде, С.В. Духина, С.Б. Жукова, Я.Л. Зимана, В.И. Кафтана, Е.А. Лупяна, А.Ю. Макарова, Д.С. Манойло, А.С. Матвеева, С.И. Матвеева, С.В. Нехина, В.П. Савиных, Н.В. Сазонова, Е.Н. Розенберга, И.Н. Розенберга, Р. Хансена (Нидерланды), В.Я. Цветкова, Д. Эртеля (Германия) и др.

Изученные работы позволяют сделать вывод, что аэрокосмические методы дистанционного зондирования представляют интерес для задач мониторинга в целях предотвращения и локализации ЧС, но вопросы их комплексного применения на железнодорожном транспорте решаются в данной работе впервые.

**Целью данной работы** является разработка технических и технологических решений для создания и практической реализации системы аэрокосмического мониторинга и предупреждения ЧС на полигонах с интенсификацией перевозочного процесса.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные задачи:

1. Разработать научную концепцию мониторинга деформаций протяженных участков пути и прилегающих территорий.

2. Сформировать модель многоуровневой системы комплексного мониторинга и предупреждения ЧС путем интеграции в единый технологический комплекс аэрокосмических и традиционных технологий.
3. Предложить и опробовать методы предупреждения ЧС путем оценки динамики изменений в состоянии железнодорожного пути и объектов на прилегающих территориях.
4. Разработать технологическую схему и систему комплексного аэрокосмического мониторинга и предотвращения ЧС.
5. Апробировать и внедрить разработанную систему комплексного мониторинга и предупреждения ЧС и ее технологических элементов на полигонах интенсификации перевозочного процесса.

**Объектом исследования** является система обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте от возникновения ЧС.

**Предметом исследования** являются методы, средства, технологии и практическая реализация системы комплексного аэрокосмического мониторинга и предупреждения ЧС применительно к протяженным участкам железнодорожных линий с интенсивным перевозочным процессом.

**Научная новизна работы.** Разработана научная концепция мониторинга пути для предупреждения и предотвращения ЧС, которая основана на выдвинутой автором гипотезе об учете влияния эксплуатационных факторов, связанных с повышением интенсивности перевозочного процесса (тяжеловесное движение, подвижной состав с повышенными осевыми нагрузками, масштабное инфраструктурное вмешательство в природу ландшафта и т.д.), на появление протяженных форм деформаций железнодорожного пути.

Разработана модель применения методов космического мониторинга в комплексе с традиционными технологиями, впервые предусматривающая построение системы многоуровневого мониторинга протяженных участков железнодорожного пути. Модель реализует принципиально новый подход к задачам мониторинга ЧС для железнодорожного транспорта.



В разработанной методике определения геометрических параметров железнодорожного пути эффективно использован комплекс существующих базовых методов исследования, в том числе численных методов, экспериментальных методик, позволивших сформировать математический аппарат обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования протяженных инфраструктурных объектов.

Впервые реализована технологическая схема и технология аэрокосмического мониторинга железнодорожного пути для предупреждения и предотвращения ЧС с использованием методов обработки данных космической радиолокации по трехмерным моделям местности, что является весьма перспективным направлением развития космических технологий, а также существенным направлением технологического развития в рамках формирования концептуального проекта ОАО «РЖД» - «Цифровая железная дорога».

Принципиальное отличие разработанной системы мониторинга заключается в комплексной обработке данных, полученных с помощью космической и авиационной съемки с беспилотных летательных аппаратов, в сочетании с результатами натуральных измерений и хронологической информации о событиях последних лет. Разработанная система позволяет оценивать в динамике параметры протяженных деформаций железнодорожного пути и объектов инфраструктуры (насыпи, мосты и т.д.) с точностью до 0,1 мм в год на участках протяженностью до сотен километров, что является принципиально новым уровнем достигаемых параметров для существующих систем и средств мониторинга.

**Теоретическая и практическая значимость** результатов диссертационной работы заключается в том, что разработанные и предложенные к использованию теоретические положения, методы и рекомендации позволяют научно обосновать новые методы мониторинга протяженных участков железнодорожного пути с построением многоуровневых систем для предупреждения и локализации ЧС, обеспечивающих повышение безопасности железнодорожного транспорта.

Реализованные в диссертации теоретико-методологический подход и технологический инструментарий позволяют формировать комплексные системы мониторинга протяженных участков железнодорожного пути.

Внедрение результатов диссертационного исследования на опытных участках железнодорожного пути общей протяженностью более 300 км подтверждает технологическую эффективность разработанных систем и технологий, показывает соответствие их теоретических и практических параметров. Практическая значимость подтверждается справками о внедрении со стороны ведущих отраслевых научно-исследовательских институтов – АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), а также Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» (ОУС ОАО «РЖД»).

**Методология и методы исследования.** Методы исследования основаны на системном анализе технологических процессов мониторинга протяженных инфраструктурных объектов, положениях теории вероятности и математической статистики, а также теории математической обработки геодезических измерений и решения координатно-временных задач дистанционного зондирования Земли.

Объект, предмет и методы исследования находятся в рамках паспорта специальности 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях, а именно пунктов:

7. Исследование проблем управления и методов принятия решений в чрезвычайных ситуациях, разработка научных основ развития систем управления, связи и оповещения, создания автоматизированных информационно-управляющих систем;

8. Разработка научных основ создания и совершенствования систем и средств прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций;

9. Разработка методологии прогнозирования природных и техногенных опасностей, рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, динамики и их последствий, оценки ущерба.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Научная концепция мониторинга железнодорожного пути для предупреждения и предотвращения ЧС с использованием аэрокосмических технологий.
2. Структура многоуровневой системы мониторинга протяженных участков железнодорожного пути, основанная на модели, использующей методы космического мониторинга в комплексе с традиционными технологиями.
3. Методы мониторинга и предупреждения ЧС путем оценки динамики изменений в состоянии железнодорожного пути и объектов инфраструктуры на прилегающих территориях.
4. Технологическая схема и технология аэрокосмического мониторинга железнодорожного пути для предупреждения и предотвращения ЧС.
5. Комплексная система предупреждения и предотвращения ЧС на полигонах с интенсификацией перевозочного процесса на базе технологии аэрокосмического мониторинга железнодорожного пути и прилегающих территорий.

**Достоверность и обоснованность результатов** диссертации подтверждается верификацией предложенных новых методов традиционными технологиями, сопоставлением полученных результатов аэрокосмического мониторинга с данными полевых исследований и статистическими данными, корректным применением известных методов и инструментов исследования, результатами обсуждения на научно-технических конференциях и форумах, а также результатами внедрения и практического применения результатов диссертационного исследования.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и отраслевых научно-технических конференциях, в том числе:

- Третьей общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2002 г.);

- Международной научно-практической конференции «Транссибирская магистраль на рубеже XX-XXI веков: Пути повышения эффективности использования перевозочного потенциала» (г. Москва, 2003 г.);
- IV общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2003 г.);
- Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)» (г. Москва, 2003 г.);
- V общероссийской научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (г. Москва, 2004 г.);
- V общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2004 г.);
- Второй открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2004 г.);
- Третьей открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2005 г.);
- VI общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2005 г.);
- Второй международной конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2006 г.);
- Пятой международной конференции «Авиация и космонавтика-2006» (г. Москва, 2006 г.);
- Четвертой открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», (г. Москва, 2006 г.);
- Третьей Международной конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2007 г.);

- Второй международной научно-практической конференции «Спутниковые технологии на службе железнодорожного транспорта» (г. Москва, 2008 г.);
- Четвертой международной конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2008 г.);
- Шестой всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2008 г.);
- Пятой международной конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2009 г.);
- Седьмой всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2009 г.);
- Третьем международном форуме по спутниковой навигации (г. Москва, 2009 г.);
- Шестой международной конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2010 г.); XI общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2010 г.);
- Восьмой всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2010 г.);
- Первом международном форуме «Транспортная наука: инновационные решения для бизнеса» (г. Москва, 2011 г.);
- XII общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2011 г.);
- Седьмой международной конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2011 г.);
- XIII общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2012 г.);

- Втором международном форуме «Транспортная наука: инновационные решения для бизнеса» (г. Москва, 2012 г.);
- Международном семинаре Россия – Европейский союз (ЕС) по исследованиям в области железнодорожного транспорта (г. Москва, 2012 г.);
- XIV общероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2013 г.);
- Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2014 г.);
- XII чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца (международная конференция, г. Москва, 2015 г.);
- Пятом международном форуме «Транспортная наука: инновационные решения для бизнеса. Экспериментальное кольцо – 85» (г. Москва, 2017г.).

По итогам федерального окружного форума глобального развития «5+5: Инновации. Приволжская инициатива» (2010 г.) среди лучших предложений Президенту России был направлен проект «ЖД-Космос», посвященный комплексному внедрению космических технологий для обеспечения безопасности транспортной инфраструктуры, разработанный автором.

Разработанная концепция информационно-технологического совершенствования системы мониторинга железнодорожной инфраструктуры одобрена в рамках семинара Россия – ЕС по исследованиям в области железнодорожного транспорта (г. Москва, 2012 г.).

Результаты практической реализации разработанных технических и технологических решений для системы мониторинга и предупреждения ЧС на полигонах с интенсификацией перевозочного процесса доложены на заседании Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» (протокол №63 от 17 сентября 2015 года).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 118 печатных работах, в том числе 19 статей в российских рецензируемых периодиче-

ских изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патент РФ на изобретение и 5 патентов РФ на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 241 наименований и приложения. Диссертация изложена на 282 страницах машинописного текста.

# **1 Анализ природно-техногенных чрезвычайных ситуаций и систем космического мониторинга**

## **1.1 Анализ чрезвычайных ситуаций по степени воздействия на железнодорожную инфраструктуру. Ключевые проблемы мониторинга**

На всем протяжении сети железных дорог России имеется значительное количество потенциально – опасных участков железнодорожного пути. Как правило, большинство таких участков известно и наблюдение за ним ведется в рамках текущего содержания пути и имеющихся в наличии технических средств и ресурсов [210]. Взяв в качестве примера Восточно – Сибирскую дорогу [105], отличающуюся достаточно сложным природно – климатическими условиями территорий пролегания железнодорожного пути, а также серьезным дефицитом человеческих ресурсов в силу невысокого уровня населенности данного региона, можно отметить, что в границах дороги 175 участков, угрожающих обвалами (более 84 км пути). При этом район достаточно сложный по рельефным, инженерно – геологическим, климатическим и гидрогеологическим условиям – обвалы, оползни, сели, навязки многочисленных рек. При том, что риски сфокусированы по главному ходу Транссиба, где в сутки проходит > 50 пар поездов, всегда существует вероятность повторения возникающих в прошлом чрезвычайных ситуаций [205]. В 1971 году сели разрушили 4,5 км верхнего строения пути, повредили 23 сооружения, а земельное полотно размыли в 30 метрах. Движение по обоям путям было прервано на 4,5 суток. Ликвидация катастрофы обошлась более чем в 2 млрд. рублей в современных ценах.

При нарушении естественного природного ландшафта возникают необратимые изменения в температурном балансе почв на прилегающей к пути территории. В первую очередь, это взаимосвязано с осушением естественных или образование искусственных водоемов, вследствие нарушений поверхностного или подземного стока воды [128, 240]. Изменение температурного режима и влажности почв наиболее критично при резких перепадах температур и смене климатической



обстановки в регионе [180], так как с изменением температурного режима грунтов на территории пролегания железнодорожного пути возникают изменения в сезонном оттаивании и промерзании.

Нарушение комплекса природных условий в ходе строительства и эксплуатации железнодорожного пути приводит к активизации криогенных процессов и явлений, неблагоприятно влияющих на устойчивость земляного полотна и объектов инфраструктуры. Т.к. в процессе эксплуатации железнодорожного пути происходит усиление негативного воздействия на территорию пролегания, крайне важно осуществлять постоянный мониторинг инженерно-криологической обстановки [180, 240], отслеживать появление и динамику развития негативных процессов для недопущения развития ЧС и природно-техногенных катастроф [237].

Для участков железнодорожного пути с постоянной угрозой возникновения и быстрого развития чрезвычайной ситуации [163, 181] целесообразно построение специальной системы мониторинга и прогнозирования ЧС [37, 166, 231].

Рассмотрим сравнительную характеристику чрезвычайных ситуаций, происшедших на территории Российской Федерации в 2016/2015 годах (таблица 1.1 и таблица 1.2) на основе опубликованных материалов на сайте МЧС России ([www.mchs.gov.ru](http://www.mchs.gov.ru)).

Таблица 1.1

ЧС по характеру и виду источников возникновения	Количество ЧС			Погибло		Пострадало	
	2016	2015	%	2016	2015	2016	2015
Техногенные	177	179	-1,12%	708	656	3970	1629
<b>Природные</b>	<b>54</b>	<b>45</b>	<b>20,00%</b>	<b>3</b>	<b>43</b>	<b>126465</b>	<b>18114</b>
Биолого-социальные	67	33	103,03%	75	0	503	1041
<b>ИТОГО:</b>	<b>298</b>	<b>257</b>	<b>15,95%</b>	<b>786</b>	<b>699</b>	<b>130938</b>	<b>20784</b>

Таблица 1.2

ЧС по характеру и виду источников возникно- вения	Количество ЧС		Погибло		Пострадало	
	2016	2015	2016	2015	2016	2015
Землетрясения, извержение вулканов	0	0	0	0	0	0
Опасные геологические явле- ния	2	0	0	0	0	0
<b>Повышение уровня грунто- вых вод</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1742</b>
<b>Бури, ураганы, смерчи, шквалы, сильные метели</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>383</b>	<b>1229</b>
<b>Сильный дождь, сильный снегопад, крупный град</b>	<b>21</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>78818</b>	<b>8989</b>
Снежные лавины	0	0	0	0	0	0
Заморозки, засуха, суховей, пыльные бури	7	16	0	0	0	0
Морские опасные гидрологи- ческие явления	0	0	0	0	0	0
Отрыв прибрежных льдов	1	0	0	0	40	0
<b>Опасные гидрологические явления</b>	<b>15</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>47224</b>	<b>0</b>
<b>Крупные природные пожа- ры</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>41</b>	<b>0</b>	<b>6154</b>

Исходя из приведенных данных [177, 215, 216, 238, 239] вполне закономерным является определение приоритетного направления научно-технической деятельности МЧС России в 2017 году: **«Научное обеспечение развития системы мониторинга и прогнозирования масштабных чрезвычайных ситуаций и**

**уменьшения опасности бедствий».** Согласно приведенной выше статистике (таблица 1.2) следует вывод, что для территории России преобладает водный фактор потенциальной опасности.

Анализ факторов природно-техногенного характера [167], приводящих к возникновению ЧС на железнодорожном транспорте, позволяет сделать вывод, что серьезным фактором риска возникновения чрезвычайной ситуации является сам железнодорожный путь – как отторгаемая антропогенная часть экосистемы [91]. Чем сложнее климатические условия – тем сильнее природа борется с «вирусом» и проявляет свой «иммунитет». Возникновение этого эффекта объясняется тем, что при строительстве и эксплуатации железнодорожного пути возникает нарушение естественной природной обстановки [240], способное провоцировать [178, 179] и усугублять природные ЧС (рисунок 1.1).

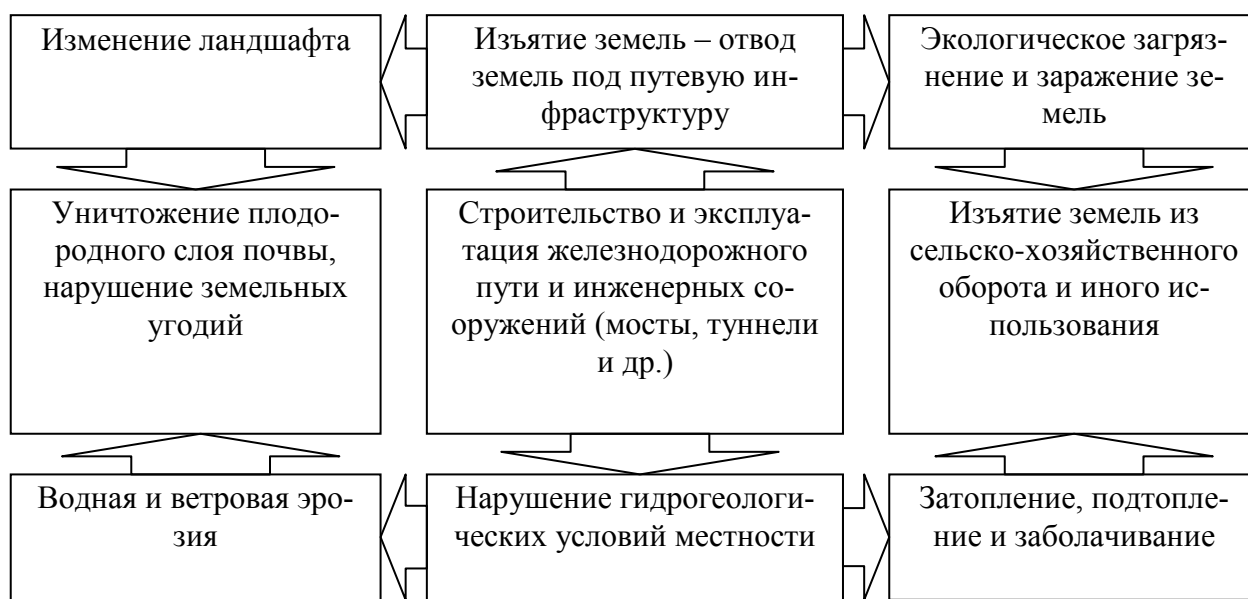


Рисунок 1.1 – Негативные экологические последствия строительства и эксплуатации железнодорожного пути

Проанализировав географическое распределение крупных природно-техногенных ЧС (рисунок 1.2), очевидно, что значительное число ЧС произошло на территориях пролегания железнодорожного пути [13, 14, 15, 164], оказав значительное негативное воздействие на инфраструктуру железнодорожного транс-

порта, в частности на железнодорожный путь, при этом в большинстве случаев движение поездов было парализовано.



Рисунок 1.2 – Географическое распределение ЧС на территории РФ  
в период с 1990 по 2009 годы

Согласно классификации предложенной Ф.П. Саваренским (1941) и И.В. Поповым (1951) можно сгруппировать и связать ряд геологических процессов и физико-геологических явлений являющихся основными причинами природно-техногенных ЧС [240] на железнодорожном транспорте (рисунок 1.3).

Исходя из вышеуказанной схемы (рисунок 1.3) и карты чрезвычайных ситуаций (рисунок 1.2), можно отметить, что территория пролегания железнодорожного пути подвержена негативному воздействию всего известного спектра физико-геологических явлений провоцирующих возникновение чрезвычайных ситуаций [91, 165]. При этом следует отметить преобладающее значение водного фактора воздействия на железнодорожную инфраструктуру, в частности, участвовавшие на территории России наводнения, сопряженные с серьезными материальными потерями и человеческими жертвами [187].



Рисунок 1.3 – Основные природные факторы зарождения ЧС на железнодорожном транспорте

В качестве показательного примера приведем ЧС случившееся 23 марта 2010 года. Железнодорожные пути в Палласовском районе Волгоградской области в ночь на вторник подтопили талые воды (рисунок 1.4). Участок железной дороги протяженностью около 15 километров подтоплен в результате прорыва дамбы около станции Эльтон со стороны Казахстана.

Из-за подтопления путей были остановлены два пассажирских поезда, максимальное время задержки составило 3 часа 15 минут. Для усиления полотна на

место происшествия направлены 47 железнодорожных машин и 3 платформы с щебнем.



Рисунок 1.4 – Подтопление железнодорожных путей в Палласовском районе Волгоградской области

Из-за резкого потепления началось активное таяние снега, и вода стала стремительно пребывать на территорию района со стороны Казахстана (рисунок 1.5). Учитывая географическую особенность района, где расположено соленое озеро Эльтон ниже уровня моря на 15 метров, потоки воды по уклону устремились в озеро.

Представленная картина подтверждает тезис о необходимости создания глобальной системы предупреждения и предотвращения ЧС [17, 184] с помощью средств аэрокосмического мониторинга железнодорожного пути и прилегающих территорий для отслеживания представленных факторов возникновения природно-техногенных чрезвычайных ситуаций [103, 104].

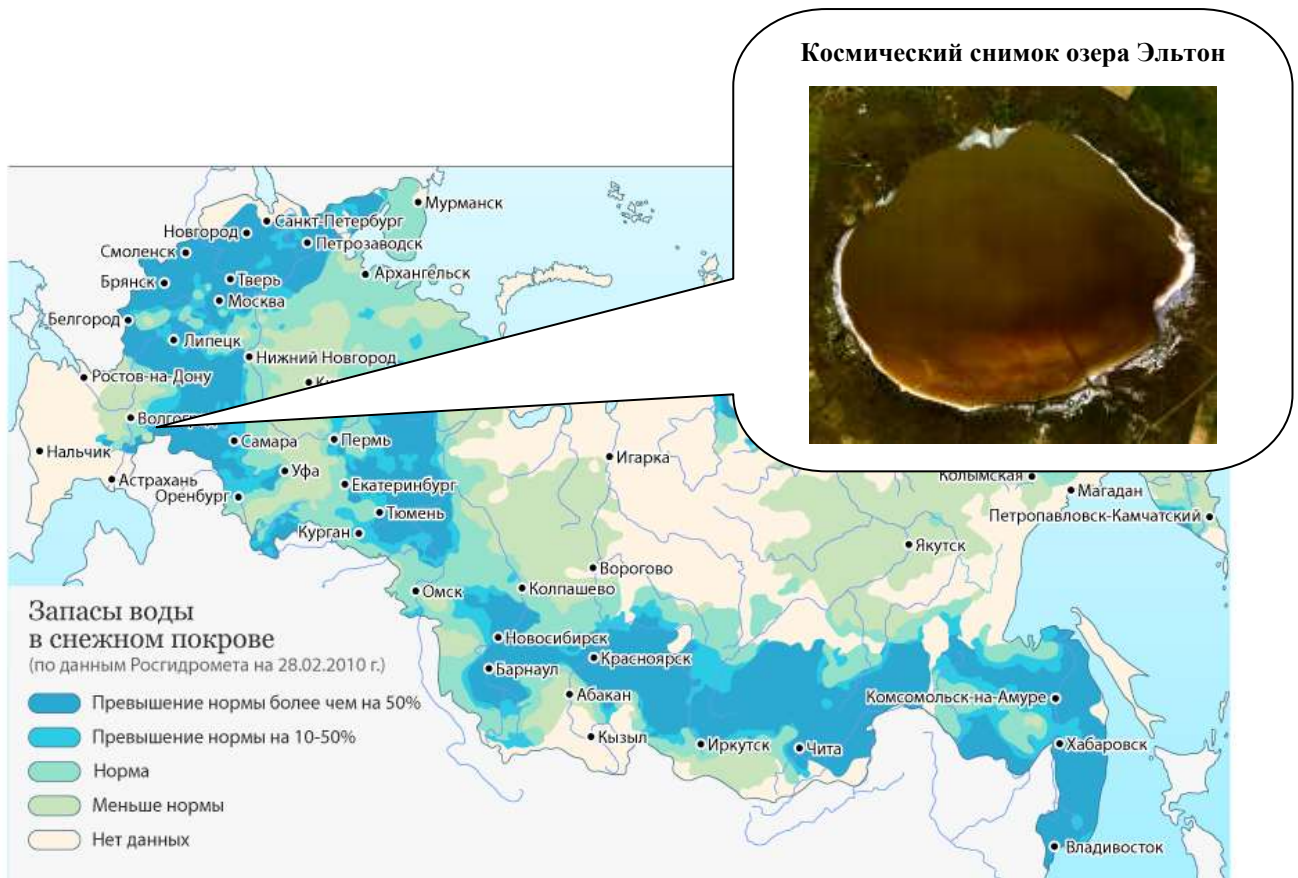


Рисунок 1.5 – Возможные зоны подтоплений на территории России

Такая постановка задачи требует единого научно-технологического подхода (задача интероперабельности) к вопросам мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути [108, 109], и в первую очередь ключевым технологическим проблемам [168, 169, 170]: унификации методов измерений, формы представления информации и нормативных требований к ее полноте и точности (таблица 1.3).

Таблица 1.3

Ключевые технологические проблемы мониторинга пути	Основные причины недостаточной эффективности мониторинга потенциально-опасных участков, и реализации мер по безопасности движения
Отсутствие в масштабах сети интеграции показаний путеизмерительных и диагностических средств в единой системе координат	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Невозможность выявления целого ряда геометрических параметров рельсовой колеи;</li> <li>- Высокая погрешность координатной привязки дефектов пути в пикетажной системе координат [110];</li> <li>- Невозможность ведения непрерывной <b>«истории состояния (болезни)»</b> каждого километра железнодорожного пути с непрерывной актуализацией информации в единой глобальной системе координат [112];</li> </ul>
Отсутствия единой системы контроля соответствия проектным и паспортным данным железнодорожного пути (в том числе на больших протяженных участках)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Невозможность <i>определения и контроля</i> с необходимой точностью проектных параметров пути на больших протяженных участках, в первую очередь высокоскоростных магистралей [145, 146];</li> <li>- Невозможность отслеживания взаимного влияния при <i>изменении состояния</i> железнодорожного пути на другие объекты железнодорожного транспорта и искусственные сооружения.</li> </ul>
Отсутствие технологий комплексного мониторинга железнодорожного пути для отслеживания опасных природно-техногенных явлений и ЧС	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Невозможность контроля событий на протяженных территориях, прилегающих к железнодорожному пути (до десятков километров удаления) оказывающих непосредственное влияние на железнодорожный путь (оползни, лавины, шторма и т.д.) [111, 112];</li> <li>- Мониторинг потенциально-опасных участков железнодорожного пути носит локальный характер, результаты не интегрируются в комплексную систему мониторинга [112].</li> </ul>



## 1.2 Зарубежный опыт разработки спутниковых систем мониторинга регионов с высоким риском возникновения чрезвычайных ситуаций

При анализе зарубежного опыта организации систем аэрокосмического мониторинга и предупреждения ЧС определено, что наибольший интерес представляет проект SLAM, финансируемый Европейским Космическим Агентством (ESA).

Проект SLAM ориентирован на создание полного комплекса технологий мониторинга и прогнозирования опасных гидро-геологических явлений на территории Италии и Швейцарии. Для территории Италии были выбраны два тестовых участка, первый в Северных Апеннинах – бассейн реки Арно, второй – на юге Италии, горный часть административного региона Кампания.

Река Арно имеет протяженность в 241 км, площадь бассейна в 8830 кв. км и протекает на высоте в 353 метра над уровнем моря. Данный участок был выбран в качестве тестового из-за того, что в бассейне реки постоянно происходит большое количество подвижек почвогрунтов (рисунок 1.6). Подвижки земной поверхности представляют собой один из видов природных катастроф с большими социальными и экономическими воздействиями, зачастую охватывающие большие территории (например, наводнения и землетрясения), и зависят от многих факторов. 75% территории Италии, расположено в горных и гористых районах, что в сочетании с климатическими и геологическими особенностями создаёт весьма нестабильную среду [19].



Рисунок 1.6

Системой выявлено 30000 локальных сдвигов и около 300 мест потенциальной опасности крупных почвоподвижек. Кроме того, в районе присутствует разветвлённая сеть инфраструктуры, которая находится под воздействием этих факторов – около 16000 жилых строений, 460 индустриальных зон и 350 км дорог.

В процессе выполнения проекта весь бассейн реки Арно был покрыт картами масштаба 1:10000, созданными традиционными наземными методами. Эту работа была выполнена региональной службой контроля состояния бассейна реки Арно. Далее в эти карт-материалы были интегрированы данные с более чем 350 снимков полученных с космического аппарата (КА) ERS1/2 с 1992 по 2002 годы на бассейн реки Арно, обработанных интерферометрическим методом [6].

В общем, суть данного метода заключается в том, что один и тот же участок земной поверхности снимается сначала дважды (на разных витках). По этим двум снимкам с помощью процедуры интерферометрической обработки создаётся цифровая карта рельефа. Затем спустя какое-то время данный район снимается вторично и строится вторая цифровая карта рельефа. Потом (после дополнительной обработки) путём сравнения этих двух карт набираются контрольные точки с точно вычисленными значениями смещений почвогрунтов [6].

В результате было получено более 65000 контрольных точек (в среднем 154 точки на 1 кв. км) с известными значениями смещений почвогрунтов. Затем эти результаты были занесены в геоинформационную систему (ГИС) и сравнены с предыдущими материалами наземного картографирования [22]. В качестве визуальной подложки использовались снимки КА SPOT5, а цифровые модели рельефа (ЦМР) были высчитаны по аэроснимкам масштабов от 1:30000 до 1:10000.

Далее по всем вышперечисленным данным было отдешифровано примерно 2000 кв. км и были получены точные данные по смещению почв на эту территорию. В результате было обнаружено 154 новые зоны нестабильности почвы. Одновременно была предложена оригинальная система классификации подвижек почвогрунтов в зависимости от их интенсивности: активные (подвижки наблюдались менее 2 лет назад), спящие (подвижки наблюдались от 2 до 20 лет назад) и неактивные (подвижки наблюдались более 10 лет назад). По полученным данным

была создана карта потенциальной опасности неблагоприятного воздействия подвижек земной поверхности (рисунок 1.7), которая была включена в уже существующую ГИС службы контроля состояния бассейна реки Арно [45].

Таким образом, была продемонстрирована возможность оценки опасности неблагоприятного воздействия подвижек земной поверхности по материалам космических радиолокационных съемок, по точности не уступающая наземным методам, а по оперативности и затратам – значительно их превосходящая [45].

Кроме того, была на практике проверена и проведена интеграция готовых продуктов в уже существующую региональную ГИС.

Очевидно, что SLAM представляет собой мощный и гибкий инструмент, позволяющий максимально полно и оперативно прогнозировать развитие опасных ситуаций, связанных с подвижками земной поверхности, предотвращать их проявления и устранять их последствия с минимальными потерями и затратами [45].

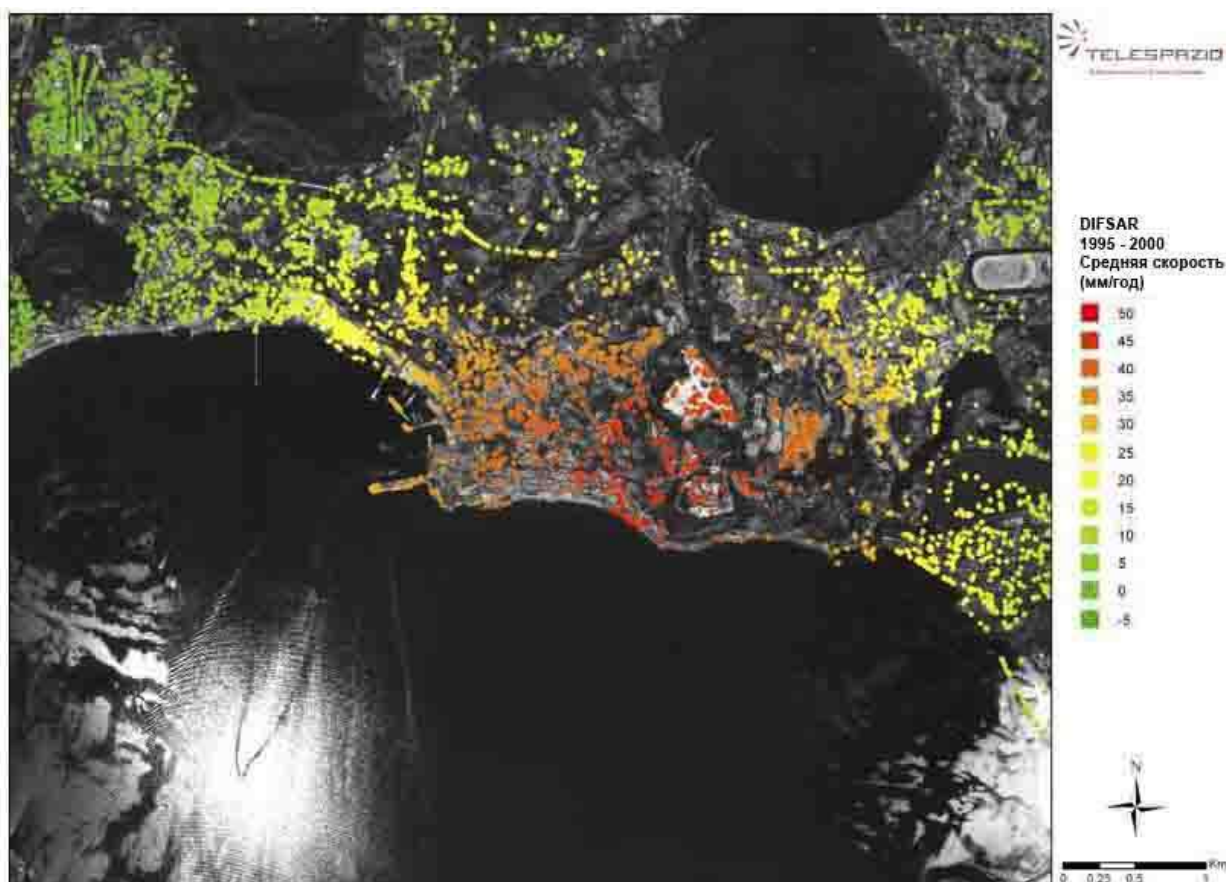


Рисунок 1.7 – Карта подвижек почвогрунтов

### **1.3 Оценка территорий пролегания железных дорог России с точки зрения рисков возникновения масштабных природно-техногенных чрезвычайных ситуаций**

В случае создания отечественной глобальной аэрокосмической системы мониторинга и предупреждения ЧС на железнодорожном транспорте необходимо оценить условия функционирования российских железных дорог в условиях риска возникновения ЧС [190].

Для оценки рисков от опасностей природно-техногенного характера, расчету подлежат интенсивности крушений, в том числе при перевозке опасных грузов (ОГ), в зависимости от интенсивности и разрушающей силы местных природно-техногенных факторов.

В соответствии с приведенными особенностями, проблема анализа риска (в данном случае, получение количественных показателей уровней природных и техногенных рисков) включает в себя решение следующих задач [142, 143]:

- оценка вероятности (частоты) реализации нежелательного события (аварии или опасного события природного характера);
- построение полей поражающих факторов, возникающих при различных сценариях развития ЧС;
- оценка последствий воздействия поражающих факторов на железнодорожную инфраструктуру, включая переход в опасное состояние (с нанесением ущерба).

При обосновании мероприятий по предупреждению аварий, катастроф и смягчению их последствий за риск обычно принимают интегральный показатель, включающий в себя как вероятность наступления нежелательного события за год, так и связанный с ним ущерб [236].

Частоты аварий, катастроф в настоящей работе определяются по картам районирования природных опасностей и по отраслевым статистическим данным о нарушениях безопасности движения поездов [142,143].

Потенциальный ущерб от возможных ЧС на железнодорожном транспорте определяют, учитывая вероятностный характер процессов, как математическое ожидание количества крушений и аварий за заданный промежуток времени. Такой подход возможен, поскольку сами понятия крушения и авария определяются через степень потерь подвижному составу, путевому хозяйству, перевозимому грузу [235]. Иными словами ущерб можно определять через интенсивность количества крушений и аварий [142, 143]. При малой интенсивности это понятие совпадает с вероятностью наступления одного неблагоприятного события (крушения или аварии).

Таким образом, под природно-техногенным риском в данном случае принимаем частоту (интенсивность) возникновения крушений и аварий, вызванных поражающими факторами природно-техногенного характера в определенной точке географического пространства [166].

Формирование карты природно-техногенных рисков в перевозочном процессе производится суммированием значений природных и техногенных рисков в расчете на один поезд-км (вероятность крушения, аварии при перевозках в расчете на один поезд-км). Техногенные риски рассчитываются по методикам согласно данным отраслевой статистики [174,175]. Результаты суммирования отображаются на карте железных дорог различными цветами, характеризующими уровни риска, вдоль железнодорожных линий [142,143].

Сравнение значений показывает, что природные риски преобладают над техногенными на отдельных участках главных ходов Восточно-Сибирской, Дальневосточной, Забайкальской, Западно-Сибирской [176], Сахалинской, Северо-Кавказской дорог [142, 143]. Для остальных дорог имеется значительное преобладание (на один-три порядка) техногенных рисков над природными, что наглядно иллюстрируется таблицей значений [142, 143] сейсмологического и техногенного риска для различных дорог (рисунок 1.8).

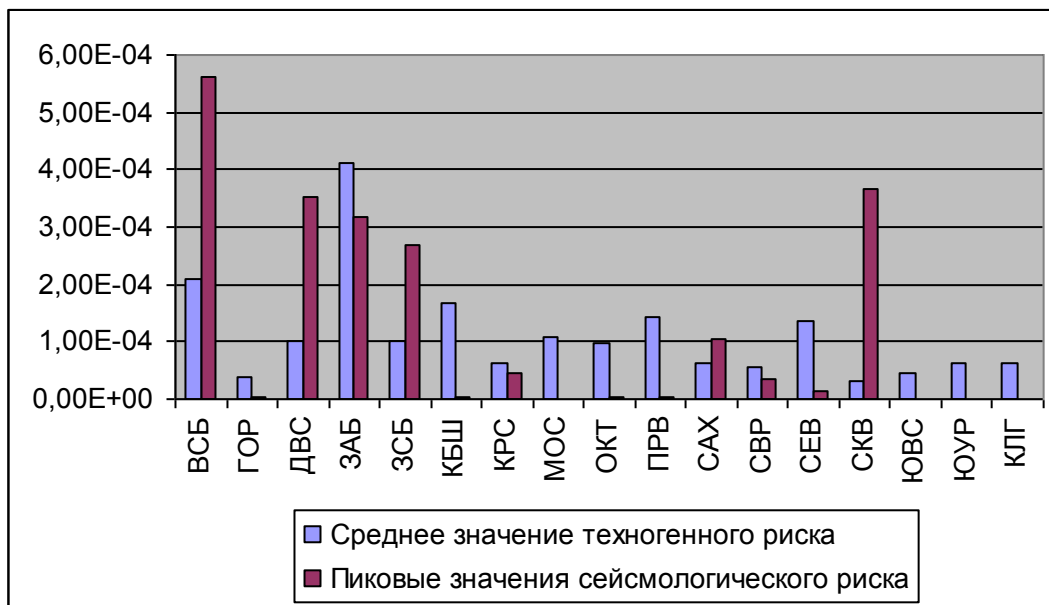


Рисунок 1.8 – Сравнение техногенных и сейсмологических рисков для железных дорог в составе ОАО «РЖД»

Ниже приведена укрупнённая карта природных опасностей [142, 143] с линиями железных дорог (рисунок 1.9).

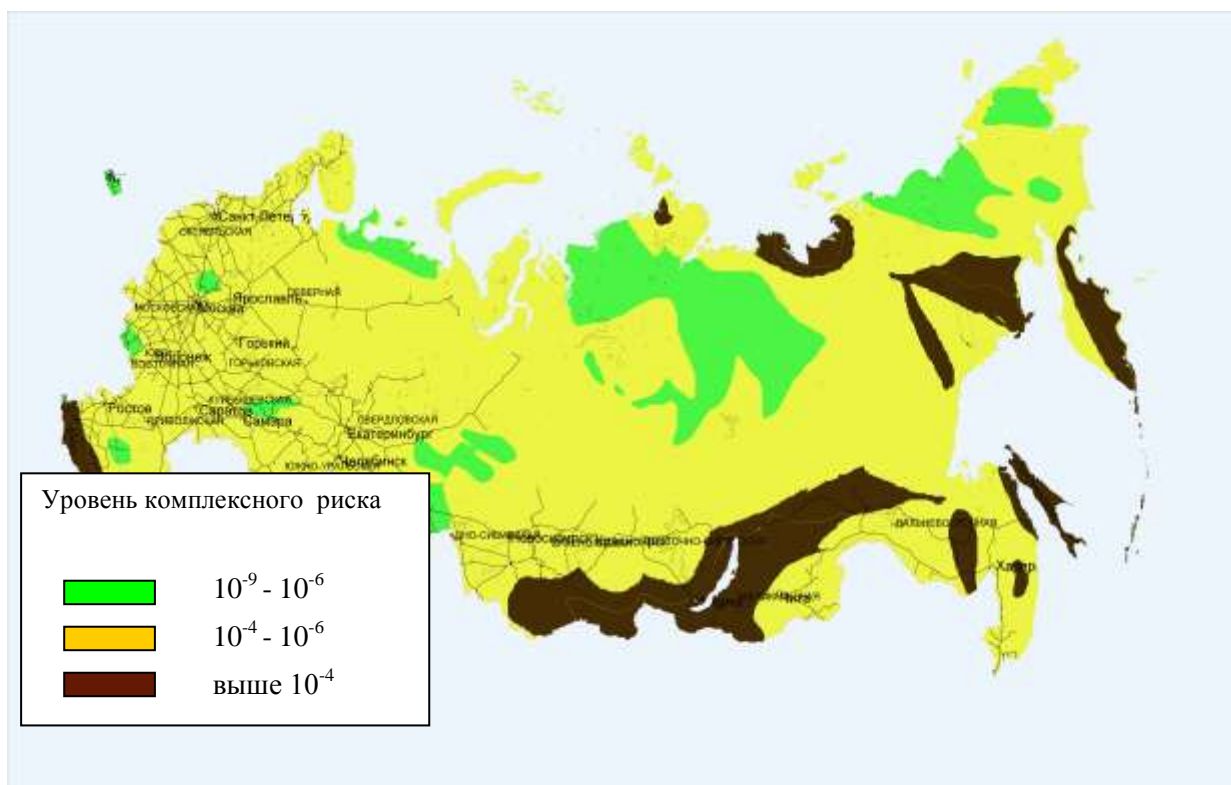


Рисунок 1.9 – Карта комплексного природного риска

Анализ полученных данных показывает [142, 143]:

1) Техногенные риски более или менее равномерно распределяются по главным направлениям сети дорог и отличаются для различных дорог не более чем на порядок. Одновременно с этим уровень природных рисков для различных регионов отличается на величину до трёх порядков (в 1000 раз).

2) При этом величина техногенного риска превышает на один-три порядка (от 10 до 1000 раз) природные риски примерно на 95% протяжённости главных направлений. К дорогам, где имеет место такое превышение, относятся: Октябрьская, Московская, Северная, Куйбышевская, Юго-Восточная, Приволжская, Свердловская.

3) Оставшиеся 5%, т.е. участки, где природный риск превышает техногенный, приходятся на:

- предгорные и горные участки Северо-Кавказской дороги;
- отдельные участки Восточно-Сибирской и Забайкальской железных дорог;
- практически половину эксплуатационной длины Сахалинской дороги (около 400 км);
- участок Дальневосточной дороги (в районе Биробиджана).

Необходимо уделять повышенное внимание главным ходам железных дорог, там, где суммарное значение природно-техногенного риска оказывается максимальным. К таковым следует отнести отдельные участки Транссиба, а также участки Северо-Кавказской дороги, проходящие в горных районах и вдоль морского побережья.

Установлено, что в отличие от равнинных участков, значение природного риска на рассматриваемом участке железнодорожного пути Туапсе-Адлер превосходит значение риска по техногенной составляющей (рисунок 1.8). Аналогичные выводы напрямую вытекают из практической деятельности на этом участке [192]. Например, в плане практических мероприятий службы пути – неотложные мероприятия по стабилизации ситуации в неустойчивых местах земляного полот-

на на этом участке железной дороги ежегодно исчисляются сотнями миллионов рублей.

#### **1.4 Описание опытного полигона разработки и внедрения спутниковой технологии мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути**

Железнодорожный путь на участке Туапсе-Адлер пролегает по юго-западным склонам Кавказского хребта, в непосредственной близости от морского берегового уступа, по сильно пересеченной местности, подступая к морю, пересекая горные реки и большое количество ручьев и балок, прорезая крутые склоны горных хребтов.

Участок Черноморского побережья Кавказа от Туапсе до Адлера имеет протяженность более 100 км. Его границами являются: с севера – мыс Кодош, с прилегающим к нему Туапсинским портом, а с юга – мыс Константиновский (Адлерский), являющиеся геоморфологическим рубежом, связанным с местом аккумуляции и частичного свала на глубины галечного материала, из потока наносов, перемещаемых с северо-запада.

На основе данных, полученных в результате многолетних наблюдений (1944 – 2005 гг.) за природными опасностями на участке Туапсе-Адлер, приведших к перерывам в движении поездов и транспортным происшествиям (материалы актов инженерно-геологической базы Северо-Кавказской железной дороги, ПЧ-19 и ПЧ-20), определен перечень рисков и опасных факторов, влияющих на состояние и функционирование железнодорожной инфраструктуры [192]:

- значительное уменьшение защитной берегоукрепительной (пляжной) линии, линия за последние 10-15 лет уменьшилась в среднем в 2 раза;
- наличие и формирование скально-обвальных косогоров (при отсутствии мер по укреплению косогоров, в среднем за 5-6 лет, происходят эрозионное вскрытие кровли глинистых отложений, что может стать причиной обвалов);



- оползни и осыпи характеризуются плохой прогнозируемостью, в значительной мере зависят от климатических особенностей региона, связанных со значительным превышением выпадения нормы осадков, а также с засорённостью водоотводов и несоблюдением строительных норм при проведении строительных работ и т.д.

Всего на участке Туапсе-Адлер зарегистрировано 118 оползней площадью 253,8 га протяженностью 31053 пм, из них закреплено (полностью или частично) 44 оползня площадью 109 га протяженностью 10400 пм.

Незакрепленные оползни представляют серьезную опасность в обеспечении непрерывности движения поездов, вызывают необходимость устанавливать посты круглосуточного наблюдения в осенне-зимний период, когда наблюдается наибольшая активизация оползневых процессов (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Последствия оползня

На участке Туапсе-Адлер зарегистрировано 55 скально-обвальных косогоров, площадью – 80,1 га, протяженностью – 14500 пм. Северо-Кавказской железной дорогой уделяется большое внимание профилактической оборке косогоров от

неустойчивых скальных образований. Специальные горно-верхолазные бригады систематически осуществляют профилактическую очистку косогоров от опасных и нависающих камней и карнизов. Однако, одни только профилактические мероприятия не обеспечивают безопасного и непрерывного движения поездов вдоль скально-обвальных косогоров, расположенных в непосредственной близости к железнодорожному пути.

Особо серьезную опасность представляет падение отдельных, сильно выветренных пачек и карнизов коренных пород, представленных мергелями, известняками, глинистыми сланцами и песчаниками.

Обвалы и падение на путь карнизов скальных пород, происходит внезапно и их предупреждение довольно затруднительно.

На основании приведенных доводов ОАО «РЖД» было принято решение о разработке спутниковой технологии мониторинга потенциально-опасных участков ж.д. пути (оползни, скально-обвальные участки и т.д.) в рамках реализации международного научно-технического сотрудничества между ОАО «РЖД» и корпорацией «Финмекканика (Телеспацио) на опытном полигоне Адлер-Туапсе Северокавказской железной дороги в рамках выполнения работы плана НТР ОАО «РЖД» №19.5.011.Н [222, 223].

Приведем расчет экономической эффективности данной технологии на период начала ее разработки в 2007-2008 годах.

Подготовка к предстоящей Олимпиаде 2014 года, проводимой в городе Сочи Краснодарского Края, подразумевала:

- напряженный план по перевозке грузов железнодорожным транспортом на участке Туапсе – Адлер;

- трехкратное увеличение объема грузовых перевозок;

рост пассажирских перевозок к 2014 г.

Дальнейшее расширение пассажиропотока на направлении Сочи в связи с эксплуатацией обширной спортивно-туристической инфраструктуры, которая будет функционировать после Олимпиады, делает вопрос устойчивости движения и грузопотока на этом участке особо важным. Невозможность срыва строительных

поставок, существенного уменьшения их объема, увеличивает необходимость дополнительных вложений, как в саму инфраструктуру участка, так и в меры предупреждения воздействия опасных природных факторов, способных приводить к перерывам в движении [192].

Нарушение устойчивости работы по причине воздействия природных факторов опасности в данном случае может вести к перенапряжению инфраструктуры участка (необходимость выполнить объем перевозок) с увеличением частоты срывов графика движения по причинам чисто техногенного характера и далее нарастанию аварийных событий [34].

Одновременно, в данном случае, несмотря на небольшую протяжённость участка (103 км), локальная потеря устойчивости движения на нем может привести к негативным последствиям для железной дороги в целом [35], поскольку ставило бы под вопрос выполнения государственного плана строительства объектов Олимпиады-2014.

Таким образом, можно обоснованно утверждать, что устойчивость движения на участке пилотного проекта и выполнение планов по перевозке грузов и пассажиров, несмотря на локальность, может повлиять на показатели работы железнодорожного транспорта в целом [36].

В связи с особой ответственностью выполнения плана перевозок, необходимо отметить следующее:

1. Помимо традиционных методов, применяемых геологическим отделом инженерно-геологической базы СКЖД, необходима технология быстрого реагирования на возможное внезапное появление угроз, не выявляемых обычными методами, в связи с зарождением источника сдвига, деформации, оползневой активности как на уже известных опасных участках, так и в других районах, расположенных в отдалении от железнодорожного пути, но непосредственно влияющих на безопасность перевозок;

2. Такие средства контроля становятся возможными при применении технологии спутникового дистанционного зондирования земли. Технология дополняет существующие средства наземного контроля – вагона инженерно-геологического

обследования дороги и геологических изысканий, путем прогнозирования ситуации на большем пространственно-временном промежутке;

3. Применение технологии спутникового мониторинга потенциально опасных участков пути необходимо в связи с медленным развитием опасных природных процессов, которые невозможно отследить методами мониторинга пути, применяемыми на железной дороге в настоящее время.

Для оценки рисков связанных с опасными природными факторами, необходимо исходить не только из принятой средней стоимости «крушения» или «аварии», а также с размером потерь связанных со срывом сроков подготовки проведения Олимпиады 2014 года в г. Сочи.

В числовом выражении ежегодный риск ущерба, связанный с природными катаклизмами на одном километре участка можно оценить следующим выражением:

$$R = p * W,$$

где  $p$  – вероятность возникновения опасного природного фактора, вызывающего остановку грузо- и пассажиропотока;  $W$  – ущерб от этого события. За  $n$  лет на участке длиной  $L$  км:

$$R = n * L * p * W,$$

Исходные данные для применения данной формулы следующие:

Оценить  $W$  можно величиной затрат на организацию Олимпиады – 2014 порядка  $30 * 10^9$  \$ , или  $7,5 * 10^{11}$  руб.

Величина  $p$  составляет  $10^{-5}$  (1/год\*км). Количество лет до проведения Олимпиады -7, длина участка -103 км. Подставляя в формулу, получаем

$$R = 7 * 103 * 10^{-5} * 7,5 * 10^{11} = 5,4 \text{ млрд. руб.}$$

Такой размер риска ущерба ниже сопоставляется со стоимостью применения ДЗЗ.

Основная стоимость проведения ДЗЗ – стоимость космической съемки участка - ориентировочно 100 тыс \$. При частоте съемки – 1 раз в месяц.

Таким образом, оценка применения технологии – 1,2 млн \$ в год, или 8,4 млн. \$ за 7 лет (около 200 млн. руб.), что в соотношении с потенциальным ущербом

бом за 7 лет - 5.4 млрд. руб., дает соотношение 1:25, в то время как принятое в мировой практике обеспечения безопасности сложных технических систем данное соотношение составляет 1:12.

При применении этой технологии на равнинных участках, в менее ответственных случаях, дает возможность уменьшить затраты на порядок, путем увеличения периода приема данных ДЗЗ.

Результат технико-экономического анализа делает применение спутниковой технологии мониторинга потенциально опасных природных факторов, влияющих на безопасность железнодорожных перевозок экономически оправданным [172, 173].

### **1.5 Космические аппараты дистанционного зондирования Земли для задач мониторинга потенциально-опасных участков пути и возникающих чрезвычайных ситуаций**

Приведем данные о космических системах дистанционного зондирования Земли, материалы съемки которых использованы при разработке и внедрении технологии [107].

В качестве источника оптических снимков высокого разрешения был выбран космический КА QuickBird (рисунок 1.11), имеющий наивысшую разрешающую способность из всех эксплуатируемых на тот момент коммерческих спутников дистанционного зондирования.



Рисунок 1.11 – Внешний вид космического аппарата Quickbird

Первый КА QuickBird был запущен в 2001 году с авиабазы Ванденберг (США). Владельцем спутника является компания DigitalGlobe (США). Спутник был выведен на околоземную солнечно-синхронную орбиту высотой 450 км, обеспечивающую его прохождение над любым районом Земли каждые 1-5 дней (в зависимости от широты). Спутник QuickBird предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 61 см в панхроматическом режиме и 2,44 м в мультиспектральном режиме при съемке в надир. Основными преимуществами спутника QuickBird являются широкая полоса охвата (размер сцены – 16,5 x 16,5 км), высокая метрическая точность и возможность заказа полигонов сложной формы. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около 7 лет.

Области применения данных дистанционного зондирования, полученных со спутника QuickBird [60, 107]:

- создание и обновление карт и планов, вплоть до масштаба 1: 2000;
- создание ЦМР с точностью порядка 2,5 м по высоте;
- городское и земельное планирование;
- сельское и лесное хозяйство;
- разведка месторождений нефти и газа и др.;
- планирование, строительство и мониторинг трубопроводов в нефтяной и газовой отрасли;
- экологический мониторинг и оценка изменений окружающей среды;
- решение прикладных задач.

Диагональная полоса, покрывающая зону участка железной дороги Адлер - Туапсе, имеет площадь 763 км<sup>2</sup>. Мозаика снимков с КА QuickBird на участке реализации пилотного проекта на участке Туапсе-Адлер представлена на рисунке 1.12. Пример снимка со спутника на рисунке 1.13.



Рисунок 1.12 – Мозаика снимков с КА QuickBird на участок Туапсе-Адлер



Рисунок 1.13 – Фрагмент снимка участка Туапсе-Адлер с КА QuickBird

Спутниковая система ERS разрабатывалась Европейским Космическим Агентством (ESA) с начала 80-х годов прошлого века. 17 июля 1991 года на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 785 км и наклоном 98,5 градусов был запущен первый аппарат серии - ERS-1 (Рисунок 1.14). Второй спутник - ERS-2, ставший преемником и конструктивным аналогом ERS-1, был выведен на такую же орбиту 21 апреля 1995 года.



Рисунок 1.14 – Внешний вид КА ERS

На первом из спутников установлено 5, на втором - 6 разнообразных инструментов дистанционного зондирования, включая оптические ультрафиолетовые и инфракрасные сканеры, радарный альтиметр и т.д. Однако, учитывая низкое пространственное разрешение большинства перечисленных приборов, наибольший интерес для широкого круга пользователей представляет радар бокового обзора с синтезированной апертурой (SAR), выполняющий съемку земной поверхности в С-диапазоне длин волн (5,6 см), с вертикальной поляризацией излучения (VV), в диапазоне съемочных углов от 20 до 26 градусов. Основные технические характеристики КА ERS приведены ниже (таблица 1.5).



Таблица.1.5

Спектральный диапазон:	5,6 см (С-диапазон)
Режимы:	Основной режим (AMI-SAR Image Mode)
Номинальное пространственное разрешение	26 - 30 м
Ширина полосы съемки:	100 км
Скорость передачи данных на наземный сегмент:	105 Мбит/сек
Радиометрическое разрешение:	8 бит на пиксел
Формат файлов:	CEOS
Обработка:	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции
Периодичность съемки:	Не более 35 суток

Расчетный срок пребывания на орбите спутника ERS-1 определялся в 3 года, однако аппарат продолжал успешно работать до 10 марта 2000 года, что позволило ESA в течение почти 5 лет эксплуатировать спутниковую группировку, обеспечивавшую удвоенную частоту съемки поверхности Земли. Также благодаря этому был проведен ряд экспериментов по радарной интерферометрии, в частности осуществлен проект «ERS Tandem», продолжавшийся в 1995 - 1996 гг. и значительно продвинувший технологии радарного дистанционного зондирования. Срок пребывания на орбите ERS-2 определялся в 2 года, однако, несмотря на мелкие неисправности, он продолжает успешно работать до сих пор, хотя в связи с поломкой записывающего устройства, съемка ведется только в пределах доступности наземных станций ESA.

Программа ENVISAT, осуществляемая ESA, направлена на исследование и мониторинг земной поверхности, атмосферы, океанов и ледникового покрова. Название программы само говорит о ее предназначении: ENViroment — природная среда, SATellite — искусственный спутник.

Первый спутник программы — ENVISAT (рисунок 1.15) — был запущен 1-го марта 2002 г. На его борту установлено 10 различных приборов, работающих в широком диапазоне волн электромагнитного спектра: от микроволновых

до ультрафиолетовых. В том числе ENVISAT оснащен радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой ASAR, позволяющим получать данные с пространственным разрешением от 30 до 1000 м в полосе обзора от 5 до 400 км вне зависимости от облачности и условий освещенности.



Рисунок 1.15 – Внешний вид КА ENVISAT

Области применения данных дистанционного зондирования, полученных со спутника ENVISAT:

- создание ЦМР с точностью 5—10 м по высоте;
- создание и обновление карт и планов, вплоть до масштаба 1:200 000;
- наблюдение за стихийными бедствиями (наводнениями, подвижками ледников и т.д.) вне зависимости от погоды и времени суток;
- изучение волновых процессов в океане, скорости и направления ветров;
- контроль береговых зон, наблюдение за судами, выявление и отслеживание нефтяных загрязнений;

- оценка сейсмической опасности, прогнозирование землетрясений, выявление сантиметровых подвижек земной поверхности с применением интерферометрических методов;

- сельскохозяйственный, лесохозяйственный мониторинг — обновление карт, слежение за состоянием посевов, контроль использования земель, незаконных вырубок и т.д.[2,3,4,5];

- отслеживание ледовой и снеговой обстановки на суше и на море.

Усовершенствованный радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА) — ASAR, установленный на спутнике ENVISAT-1 использует фазированную антенную решетку с углом падения лучей от 15 до 45 градусов. Съемка выполняется в С-диапазоне длин волн (5.6 см) на пяти различных поляризациях (VV, HH, VV/HH, HV/HH, VH/VV).

Основные области применения получаемых данных — это изучение морской поверхности, динамики объема морских льдов, мониторинг таких процессов, как обезлесение и опустынивание, и многое другое [60].

Характеристики орбиты и режимов работы спутника ENVISAT-1 приведены в таблицах ниже (таблица 1.6 и таблица 1.7).

Таблица 1.6

Тип орбиты	Круговая, солнечно-синхронная
Высота орбиты	799.8 км
Наклонение	98.55 градусов
Период обращения	100.59 мин
Периодичность повторения трассы полета	35 суток
Частота съемки	от 1 до 3 суток

Таблица 1.7

Режим	Ширина полосы обзора (км)	Разрешение (м)	Поляризация
Стандартный (Image Mode)	от 56 до 100	30	VV, HH
Поляризационный (Alternating Polarisation Mode)	от 56 до 100	30	HH/VV, HH/HV, VV/VH
Широкополосный (Wide Swath Mode)	400	150	VV, HH
Глобального мониторинга (Global Monitoring Mode)	400	1000	VV, HH
Спектральный (Wave Mode)	5	30	VV, HH

Ниже на рисунке 1.16 схематично показаны режимы съемки. Примеры радиолокационных снимков приведены на рисунках 1.17 и 1.18.

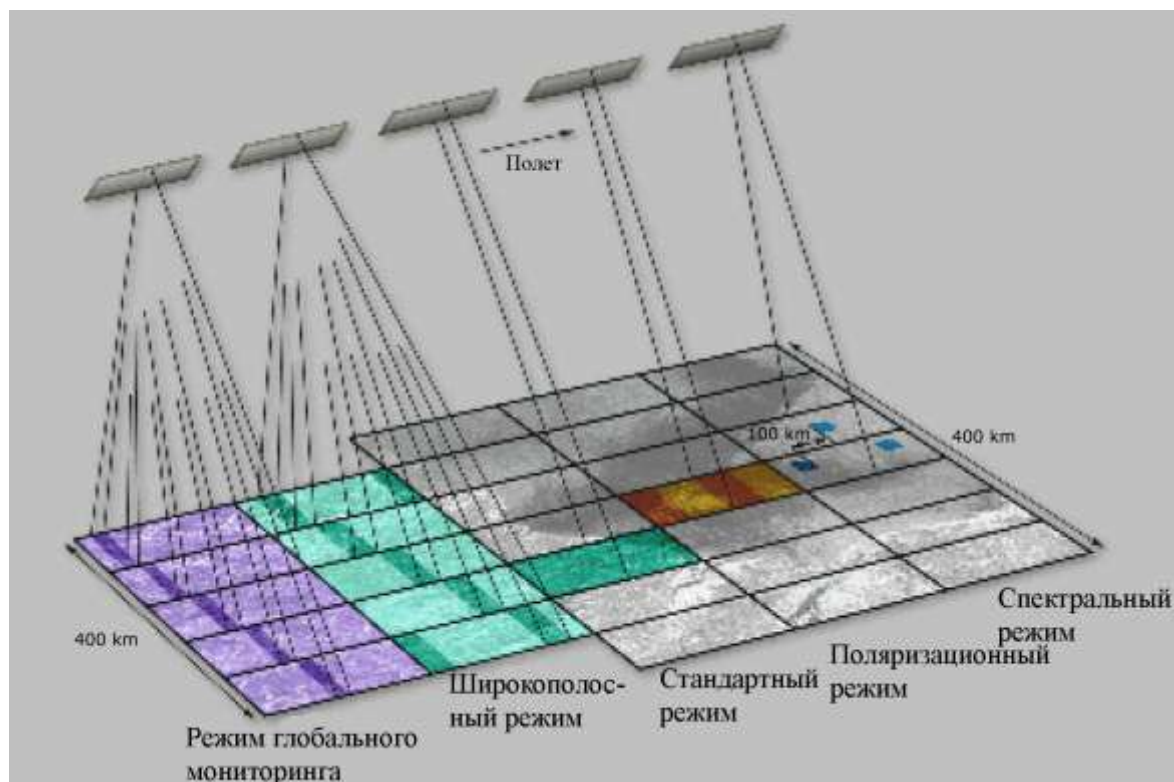


Рисунок 1.16 – Схема режимов съемки КА ENVISAT

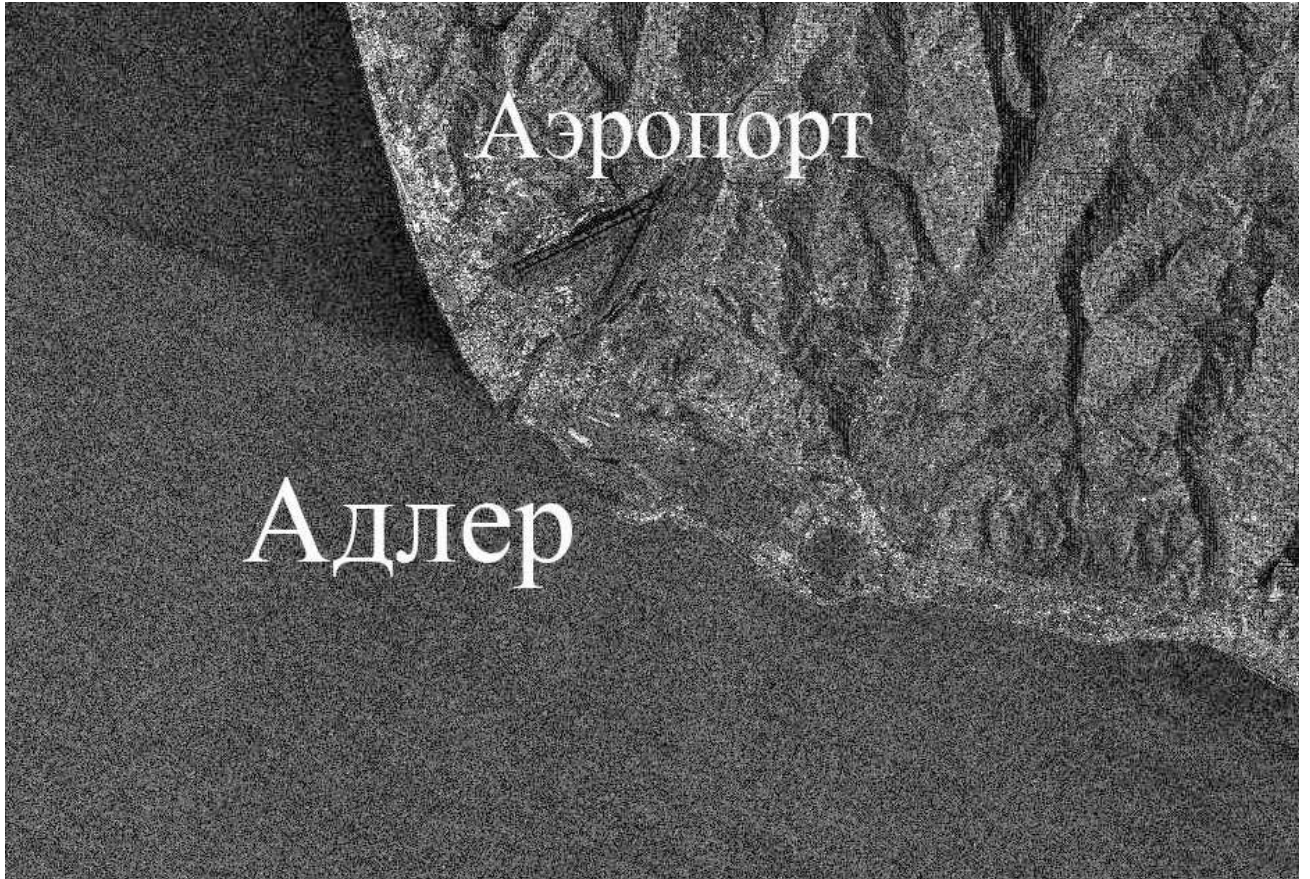


Рисунок 1.17

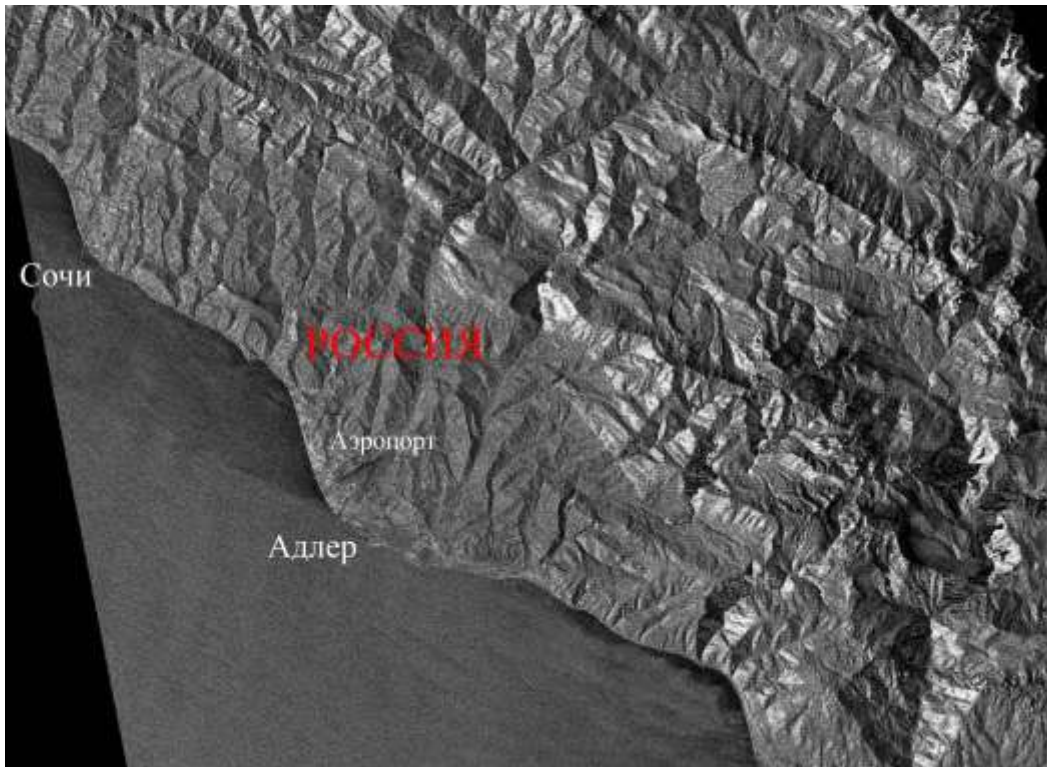


Рисунок 1.18

Японский спутник исследования Земли ALOS (Advanced Land Observing Satellite) был успешно запущен 24 января 2006 года. 24 октября, через девять месяцев орбитальных испытаний, спутник начал свою работу в полном режиме. На борту КА установлены три камеры, позволяющие получать как панхроматические (PRISM) и мультиспектральные (AVNIR-2) оптические данные, так и радиолокационные (PALSAR).

Уникальной особенностью сенсора PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) является возможность получения триплетов, которую обеспечивают три независимые оптические системы, ведущие съемку в надир, вперед и назад. Панхроматические стереоизображения с пространственным разрешением 2.5 м используются, в основном, для картографирования, городского планирования, создания ЦМР и 3D-моделей. Вторая камера AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type-2) предназначена для получения мультиспектральных снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с разрешением 10 м, которые могут быть полезны для мелкомасштабного картографирования, лесного и сельского хозяйства и пр. Радиолокатор с синтезированной апертурой PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) передает информацию в трех режимах с разрешением от 7 до 100 м в полосе обзора от 20 до 350 км. Основные области применения радиолокационной информации — наблюдение за паводками и наводнениями, нефтяными пятнами, деформациями поверхности, обнаружение судов, оценка объема биомассы и др [33]. Масса КА около 4000 кг (180 кг гидразина). Солнечные батареи (размер 22 м x 3 м) вырабатывают 7 кВт. КА ALOS имеет 5 комплектов NiCd батарей. Время жизни спутника составляет 3 года с возможностью продления до 5 лет.

Программу ALOS отличает заранее составленный план съемки, целью которого является неоднократное получение глобального покрытия земной поверхности.

Данные дистанционного зондирования, полученные со спутника ALOS применяются при [60]:

- создании и обновлении топографических и специальных карт, вплоть до масштаба 1:50000;
- создании ЦМР с точностью 5-10 м;
- определении породного состава, мониторинг вырубок и состояния лесов;
- наблюдении за природными бедствиями;
- изучении и оценке подвижек земной поверхности, с использованием интерферометрических методов;
- контроле использования природных ресурсов.

Основные параметры системы приведены в таблицах ниже (таблицы 1.8-1.10).

Таблица 1.8 – Характеристики орбиты КА ALOS

Тип орбиты	Солнечно-синхронная
Высота орбиты	691.65 км
Наклонение	98.16 град.
Период обращения	98.7 мин
Периодичность повторения трассы полета	46 суток
Предполагаемый срок эксплуатации	5 лет

Таблица 1.9 – Основные характеристики оптической съемочной аппаратуры КА ALOS

Сенсор	PRIZM	PRIZM	AVNIR
Режим	Mono	Triplet	
Пространственное разрешение (м)	2.5	2.5	10
Ширина полосы съемки (км)	70	35	10
Радиометрическое разрешение (бит)	8	8	8
Спектральный диапазон, мкм Green Red NIR SWIR	0.52-0.77	0.52-0.77	0.42-0.5 0.52-0.6 0.61-0.69 0.76-0.89

Таблица 1.10 – Характеристики режимов работы радиолокатора с синтезированной апертурой PALSAR KA ALOS

Режим	Ширина полосы обзора (км)	Пространственное разрешение (м)	Поляризация
Детальный (Fine)	от 40 до 70	от 7 до 44 от 14 до 88	HH или VV HH+HV или VV+VH
Обзорный (ScanSAR)	от 250 до 350	100	HH или VV
Поляризационный (Polarimetric)	от 20 до 65	от 24	

### **1.6 Концептуальные задачи по созданию комплексной системы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути и предупреждению чрезвычайных ситуаций**

Создание и внедрение аэрокосмических технологий дистанционного зондирования на железнодорожном транспорте позволит решать ряд крупных задач практической деятельности железнодорожного транспорта:

- мониторинг природно-техногенного воздействия на потенциально-опасные участки железнодорожного пути;
- мониторинг загруженности железнодорожной сети и прогнозирование ее развития;
- проектирование при строительстве и мониторинг состояния железнодорожного пути.

Каждую из трех сформулированных задач можно условно дифференцировать на три стадии, в зависимости от временного интервала и периода ее решения. Стадии можно назвать следующим образом:



- оперативная – происходит в короткий отрезок времени после момента наступления определенного события;
- технологическая – происходит планомерно и является неотъемлемой частью производственного процесса;
- проектная – происходит периодически для прогнозирования дальнейшего развития.

Таким образом, формируется матрица (3 x 3), отражающая основные стадии решения практических задач с использованием результатов аэрокосмического мониторинга (рисунок 1.19).

<b>ОПЕРАТИВНЫЕ</b>		
Проведение оперативного мониторинга участков возникновения чрезвычайных ситуаций с целью координации взаимодействия участников устранения последствий ЧС	Получение оперативных материалов мониторинга загруженности отдельных железнодорожных станций, подходов к портам и местам мультимодальной перевалки грузов	Проведение оперативного выборочного мониторинга с целью контроля текущего содержания пути
<b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ</b>		
Контроль природно-техногенного воздействия и анализ состояния полосы отвода и охранных зон железнодорожного транспорта, объектов инфраструктуры и железнодорожного пути	Периодический (сезонный) мониторинг загруженности отдельных железнодорожных станций, подходов к портам и местам мультимодальной перевалки грузов	Выявление и определение местоположения дефектов железнодорожного пути и искусственных сооружений
<b>ПРОЕКТНЫЕ</b>		
Выявление участков железнодорожного пути, потенциально опасных с точки зрения возникновения экологических катастроф, которые могут произойти в случае аварий железнодорожного транспорта	Прогнозирование развития сети железных дорог России по результатам глобального спутникового мониторинга ключевых участков железнодорожного пути и стационарного развития	Подготовка исходных данных проведения предпроектных обследований и разработки проектов комплексного развития железнодорожной инфраструктуры, проектирования и строительства железнодорожного пути

Рисунок 1.19 – Матрица задач аэрокосмического мониторинга

Сформируем матрицу научных задач диссертационного исследования направленных на решение ключевых положений Стратегии инновационного развития ОАО "Российские железные дороги" (Белая книга ОАО "РЖД") в части мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути (Рис.1.20).



Рисунок 1.20

Проведенные исследования явились одним из оснований включения в Стратегию инновационного развития ОАО "Российские железные дороги" (Белая книга ОАО "РЖД") приоритетного направления «Внедрение инновационных спутниковых и геоинформационных технологий». Непосредственно с участием автора,

как члена редакционной комиссии, сформулированы три перспективные задачи научно-технического развития железнодорожного транспорта в целях обеспечения безопасности движения:

- спутниковые технологии мониторинга состояния пути, а также объектов железнодорожной инфраструктуры в полосе отвода;

- спутниковые технологии мониторинга потенциально опасных объектов и крупных искусственных сооружений железнодорожного транспорта;

- технологии комплексной обработки спутниковых навигационных данных и материалов спутниковой съемки по местам повышенного риска и возникновения ЧС.

## 2 Концепция аэрокосмического мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути и предотвращения чрезвычайных ситуаций с учетом мировых тенденций технологического развития

### 2.1 Тенденции развития железнодорожного транспорта с точки зрения неблагоприятного воздействия на инфраструктуру

В настоящее время железнодорожный транспорт вошел в активную фазу применения новых технических средств, и, в первую очередь, нового подвижного состава (длинносоставные грузовые и высокоскоростные пассажирские поезда) которые приводят к тому, что путь подвергается новой форме воздействия – объемным деформациям (сдвиги насыпей и других сооружений, появление много-радиусных кривых и др.) [7, 194]. Примером такого воздействия может служить модель поведения пути при прохождении длинного тяжеловесного поезда по кривым участкам железнодорожного пути (рисунок 2.1), когда действующие на железнодорожный путь силы приводят к поперечному сдвигу («правило буравчика») и возникновению продольного растяжения всего участка (что подтверждается международным опытом UIC).

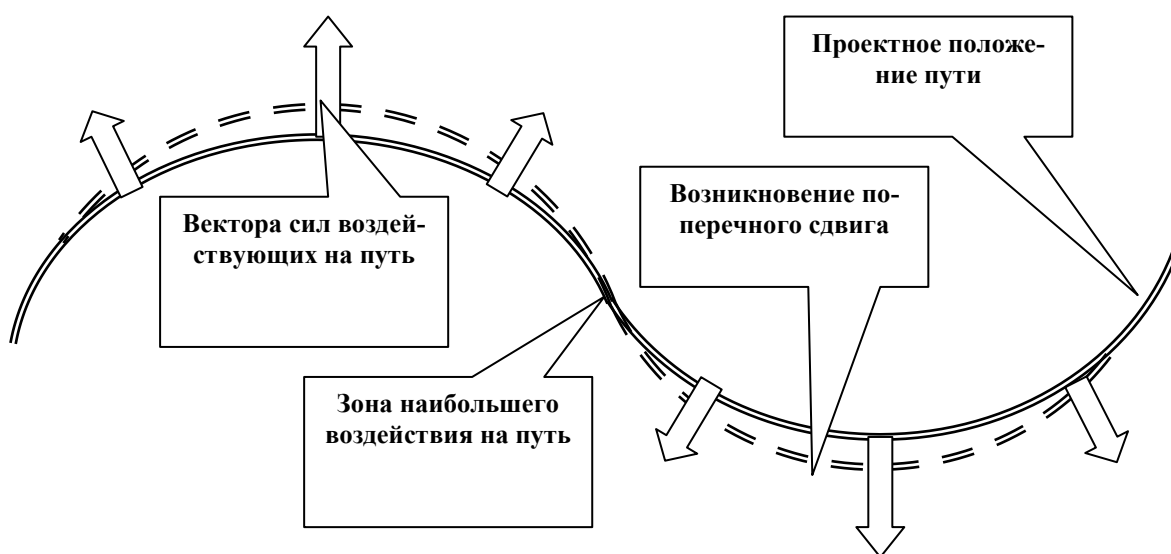


Рисунок 2.1

При рассмотрении результатов обобщения мирового опыта тяжеловесного движения в области конструкции и содержания инфраструктуры, опубликованных международной ассоциацией тяжеловесного движения (ИННА) можно сформулировать важные организационные мероприятия не учитываемые в достаточной степени при организации мирового тяжеловесного движения [7]. Согласно выводам ИННА возникает циклическая зависимость: повышенная динамическая нагрузка на путь приводит к повышенному напряжению пути [7, 194], напряженное состояние пути приводит к его повреждениям и нарушению геометрии, нарушение геометрии пути приводит к усилению динамических нагрузок со стороны проходящих поездов (рисунок 2.2). Для поддержания требуемых параметров динамики воздействия поездов, напряженности и геометрии пути необходим постоянный мониторинг и технологическое вмешательство в систему для приведения ее к требуемым параметрам [7, 226].

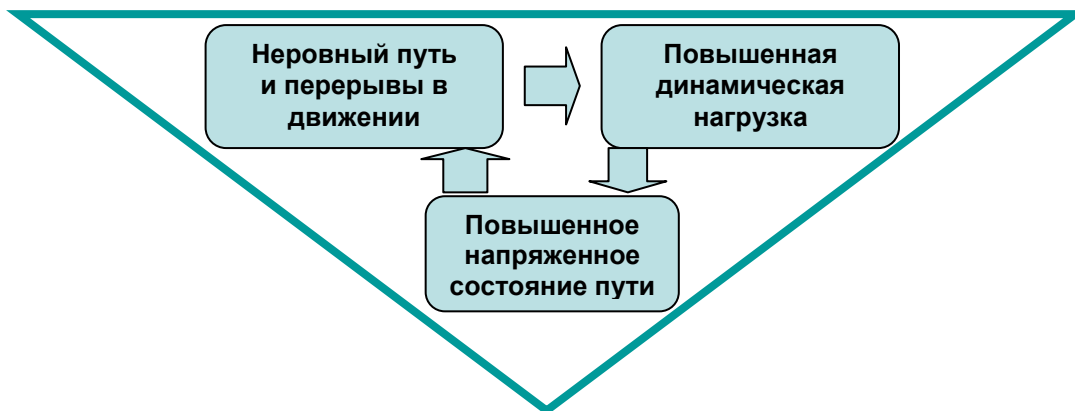


Рисунок 2.2 – Взаимосвязь состояния пути и динамической нагрузки на него по версии Майкла Роуни (ИННА)

При анализе публикаций и результатов исследований в области взаимодействия пути и подвижного состава можно сделать вывод, что при увеличении массы, длины и скорости поезда изменяются принципиальные подходы к задачам мониторинга [7, 225] и предупреждения ЧС на железнодорожном транспорте (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Тенденции в развитии задач мониторинга железнодорожного пути и предупреждения ЧС

До настоящего времени, как правило, экипаж и путь рассматривались как система, а зона активного негативного взаимодействия неисправного пути и колеса представлялась точечной [7, 225]. С учетом вышеуказанных выводов можно говорить о расширении зоны негативного воздействия [194], когда неисправности пути и подвижного состава усугубляют друг друга (рисунок 2.4).

С возрастанием массы, длины и скорости поезда в значительной степени возрастает энергия, рассеиваемая при взаимодействии колесных пар поезда и пути, расходуемая на повреждаемость пути и подвижного состава.



Рисунок 2.4

Специалистами ИННА был поставлен эксперимент, позволивший оценить величины энергии, расходуемой при взаимодействии с наружным рельсом первой колесной пары для 30-, 60- и 120- вагонного поезда [7]. В соответствии с полученными результатами можно сказать, что энергия, расходуемая при взаимодействии пути и колесной пары, возрастает в геометрической прогрессии при увеличении количества вагонов в составе поезда [7, 225]. Так при увеличении количества вагонов в составе поезда в 2 раза, а энергия, расходуемая на повреждаемость пути, увеличивается в 4 раза.

Если рассмотреть полученные модели распределения боковых сил по длине поезда при различных вариантах распределения тяги, движущегося в кривой, возможно построить модели распределения зон максимального неблагоприятного воздействия, которое в конечном итоге приводит к геометрическим искажениям пути на протяженных участках и вызывает смещение пути вместе с искусственными сооружениями, а также способствует появлению сложных многорадиусных кривых (рисунок 2.5), что подтверждает тезисы начала главы (рисунок 2.1).

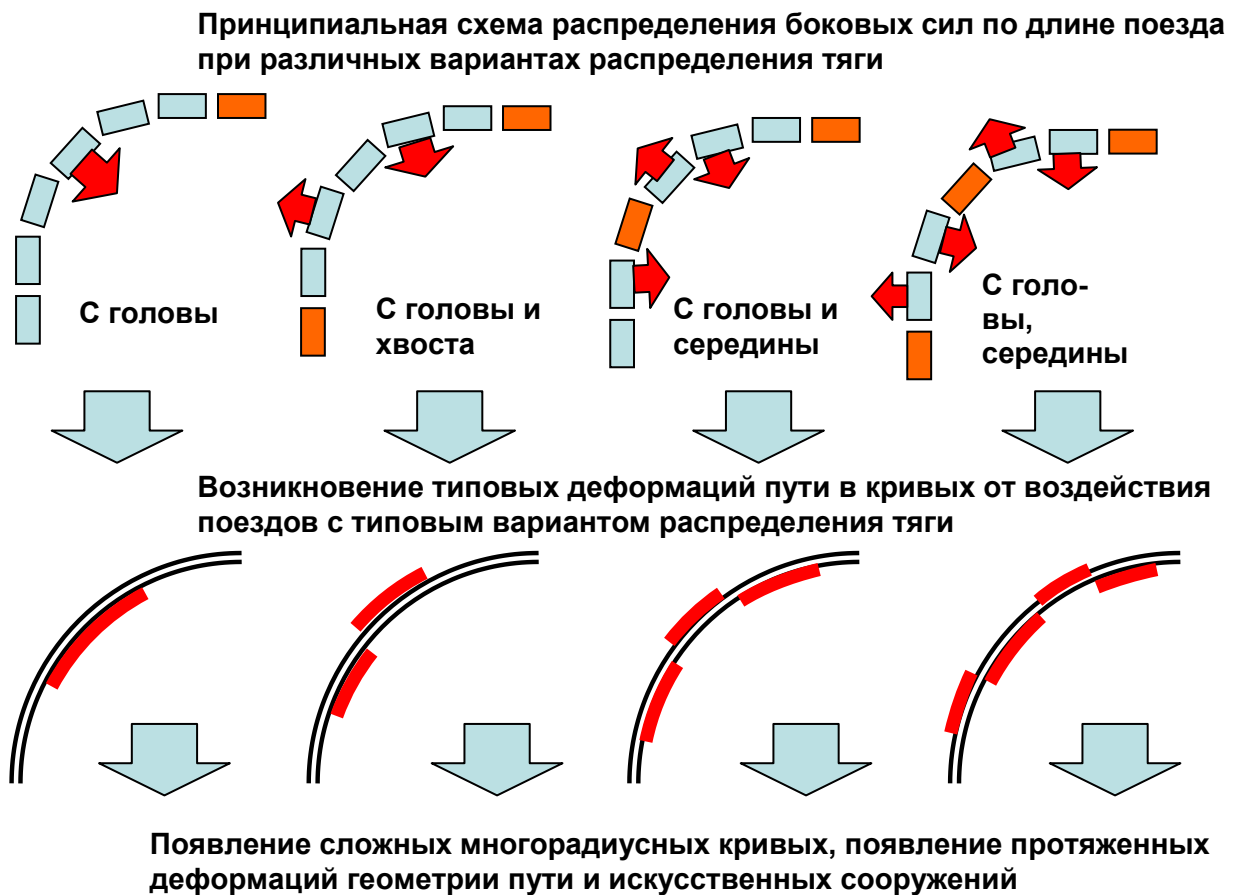


Рисунок 2.5 – Типовые модели распределения зон максимального неблагоприятного воздействия на путь

При развитии приведенной теории ИННА по взаимодействию динамики воздействия поезда на путь становится очевидным, что исходя из параметров проходящих поездов и геометрических параметров участка пути возможно построение модели участка пути, а также определение параметров поезда, минимизирующих негативное воздействие [225]. Согласно разработанному алгоритму, в первую очередь определяется динамическая модель воздействия на путь (рисунок 2.6). Далее по динамической модели определяются участки пути, подверженных деформации, их возможный характер и скорость деградации. Затем строится оптимальная геометрическая модель пути и дружественные к ней требования к параметрам поезда.



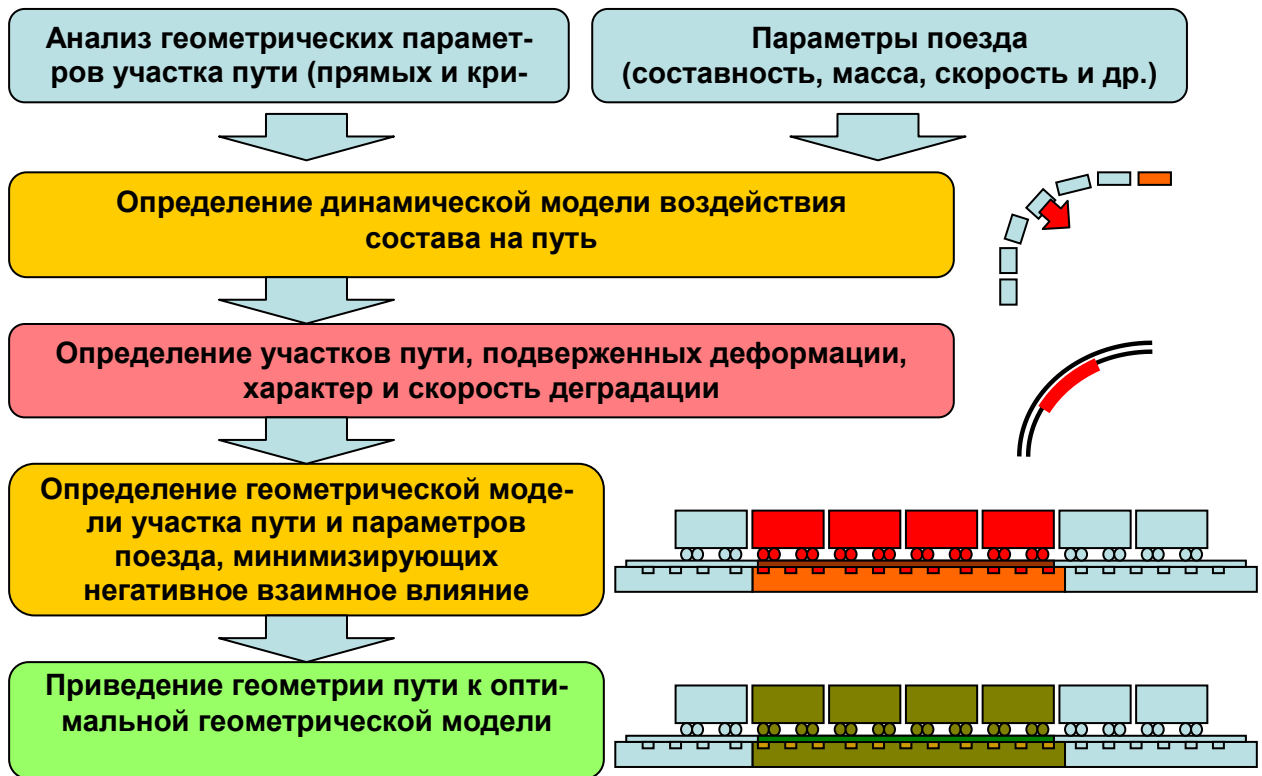


Рисунок 2.6 – Построение оптимальной модели пути и поезда

Реализация представленной на рисунке 2.5 схемы определения оптимальных параметров пути и состава возможно только в том случае, если параметры поездов проходящих по участку пути однотипны.

В случае смешанного движения на Российских железных дорогах на большинстве участков пути не представляется возможным выделить один тип поездов, на который можно ориентироваться в вычислениях. В случае следования по участку пути поездов различающихся по длине, массе, скорости, распределению тяги и другим параметрам, целесообразно построение другого алгоритма вычислений (рисунок 2.7). В первую очередь необходимо выявить участки пути подверженные деформациям. Исходя из полученного результата, становится возможным определение динамической модели неблагоприятного воздействия состава на путь и наиболее неблагоприятных для пути параметров поезда и тяги, которые необходимо избегать при формировании поездов на данном участке.

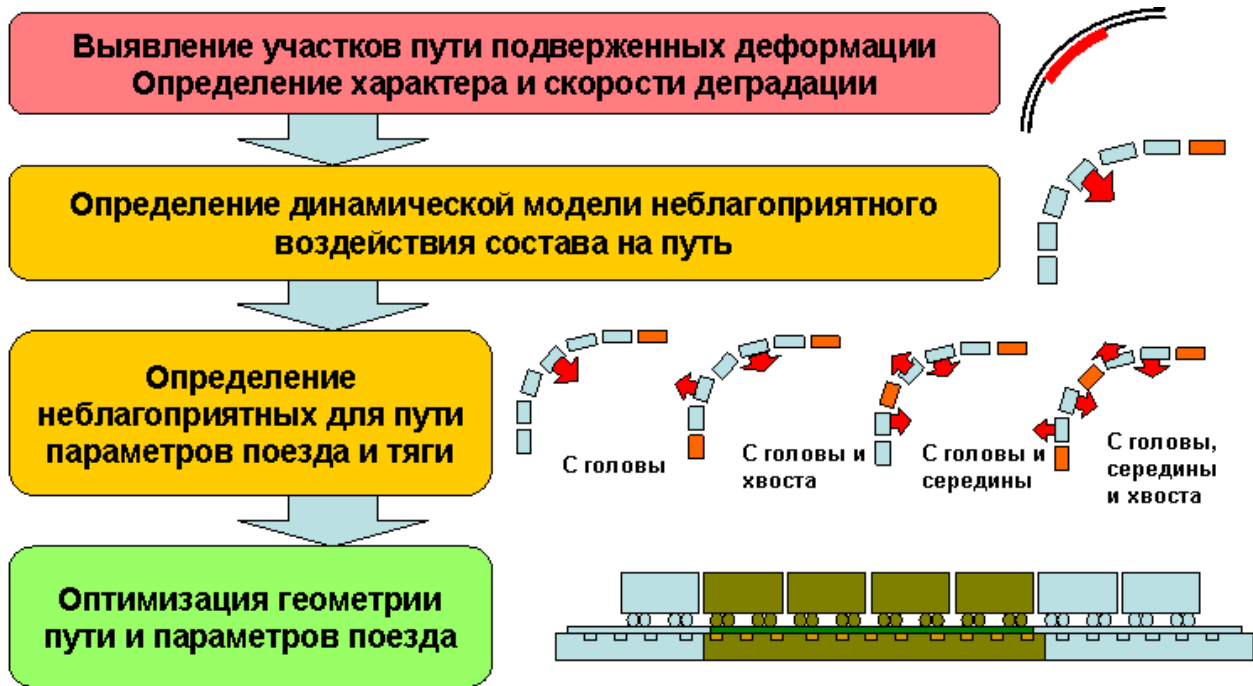


Рисунок 2.7 – Построение оптимальной модели поезда и пути для смешанного движения

Изменение геометрии пути чревато еще одним чрезвычайно опасным явлением – выбросами пути [7]. Температурный выброс пути — характерное изменение пути в плане в результате самопроизвольной разрядки температурного напряжения в рельсах железнодорожного пути. За время около 0,2 с образуется резкое искривление рельсов (до 0,3—0,5 м на длине 20—40 м) с несколькими волнами в горизонтальной плоскости. Рельсы приобретают остаточные деформации и становятся непригодными для работы в пути, часть шпал раскалывается, щебень с балластной призмы отбрасывается. Выброс пути является серьезной угрозой безопасности движения поездов, при возникновении выброса пути движение поездов на участке закрывается.

Изменение геометрии пути под воздействие поездов и природных явлений может стать катализатором возникновения выбросов, комплексно влияющим на другие факторы возникновения выбросов пути [7]. Контроль положения пути на протяженных участках является одним из ключевых факторов противодействия выбросам (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Влияние геометрии пути на сопротивляемость выбросам

В настоящее время мировая практика мониторинга геометрических параметров пути [7] выделяет два основных вида контроля – экспертная оценка (технический осмотр) и автоматизированный контроль (рисунок 2.9). В случае экспертной оценки в качестве диагностической системы выступает сам человек, и эффективность контроля зависит от опыта и аналитических качеств осматривающего. Опытный инженер определяет геометрию пути по физическим ощущениям во время обзорной поездки на поезде. В случае автоматизированного контроля большая часть функций сбора и обработки диагностической информации передается электронно-вычислительной технике [7, 188].

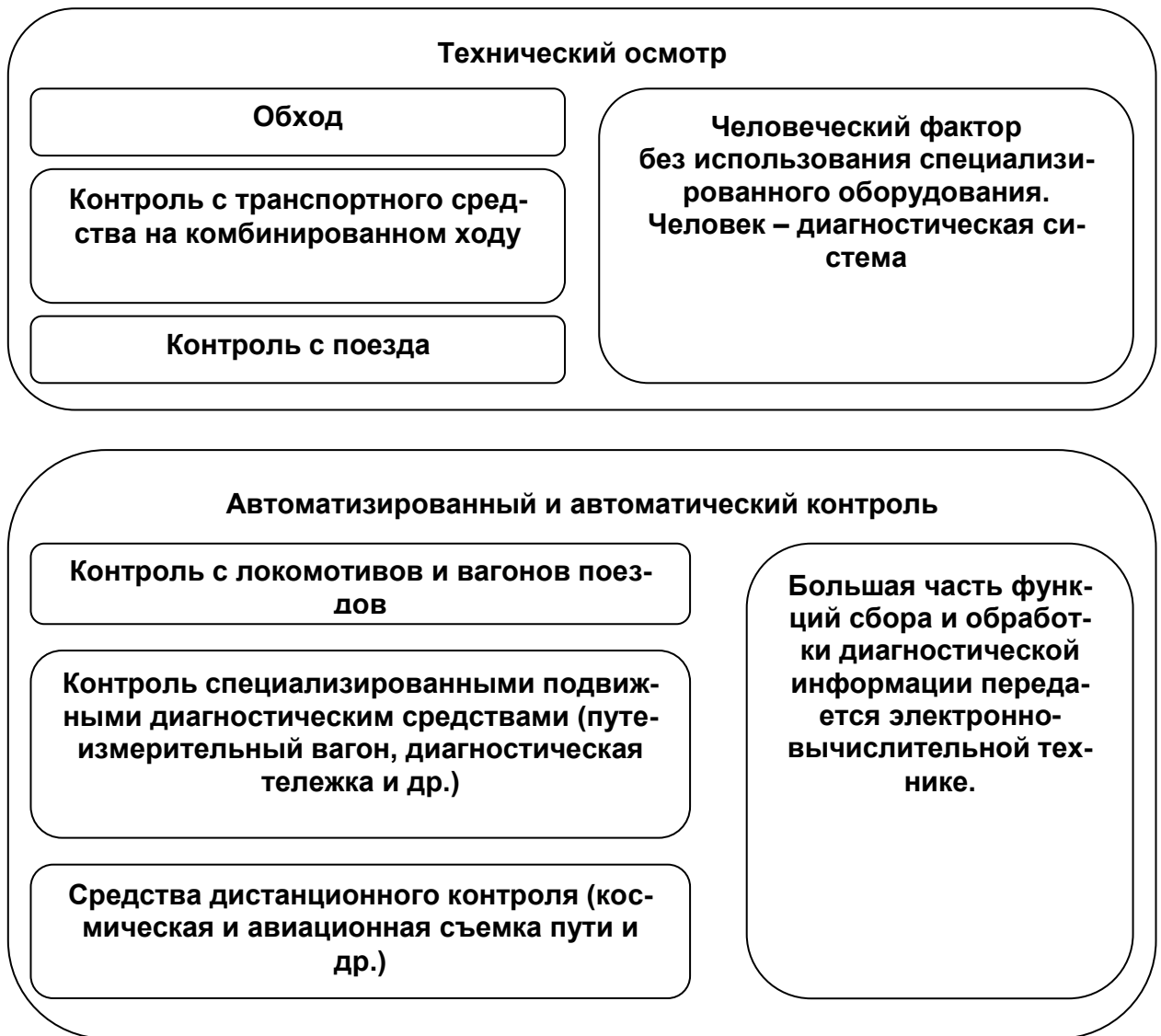


Рисунок 2.9 – Основные методы международной практики контроля геометрии железнодорожного пути.

Подводя итог рассмотрению опыта ИНА [7] и анализируя взаимосвязь пути и динамической нагрузки на него (рисунок 2.10) можно сформулировать три ключевых фактора, применение которых позволит снизить негативное воздействие на путь со стороны поездов и негативных природно-антропогенных явлений на прилегающих к пути территориях [99]:

- оптимизационное моделирование геометрических параметров пути на протяженных участках [227, 228];
- мониторинг геометрических параметров пути и инфраструктуры на протяженных участках;

- мониторинг влияния природно-техногенных факторов ухудшающих состояние пути и инфраструктуры (отслеживание изменения геометрии потенциально-опасных объектов на прилегающих территориях к пути).

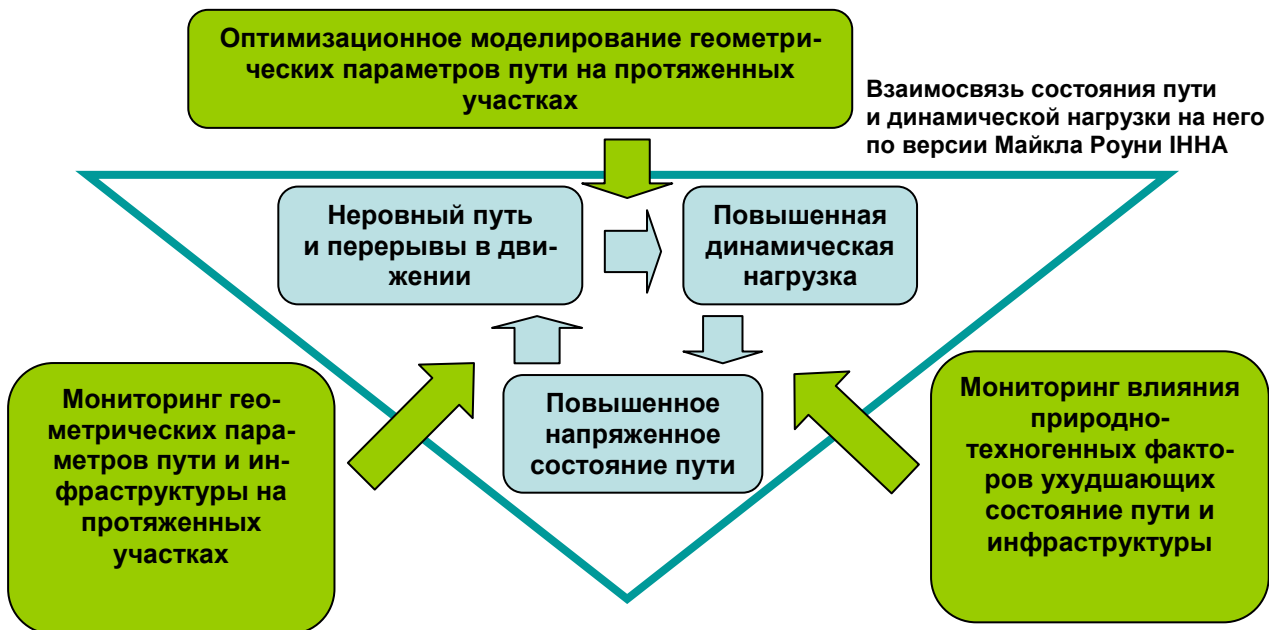


Рисунок 2.10 – Новые инструменты противодействия негативному воздействию на путь поездов и природно-антропогенных явлений

## 2.2 Эволюция методов и средств мониторинга пути и предупреждения чрезвычайных ситуаций

Единственным эффективным средством реализации новых форм мониторинга пути являются космические технологии дистанционного зондирования, позволяющие одновременно оценивать геометрические параметры пути и прилегающих территорий на протяженных участках [100].

На данный момент, когда имеет место широкое внедрение тяжеловесного и высокоскоростного движения, возникает необходимость в комплексной оценке протяженных участков железнодорожного пути [99]. Этот и ряд других факторов потребовали поиска принципиально новых принципов мониторинга и диагностики железнодорожного пути [83]. И это, в свою очередь, позволило сделать новый

шаг и привело к применению спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS на железнодорожном транспорте [140].

На основе анализа мирового опыта сделан следующий вывод, что современные инфраструктурные Компании (как и все современное общество) входит в активную фазу применения геоинформационных и спутниковых технологий. Анализируя этапы развития путевого хозяйства и железнодорожного транспорта в целом можно выделить несколько основных, связанных с развитием технологий обработки информации прошедшего двадцатого века и наступившего двадцать первого [98, 100, 101]: механизация; автоматизация; информатизация; геоинформатизация (этап масштабного внедрения и тиражирования технологий комплексной обработки пространственно-распределенной информации в производственные задачи железнодорожного транспорта); интеллектуализация (перспективный этап внедрения интеллектуальных систем и технологий в путевом комплексе, целью которого является создание к 2100 году интеллектуальной роботизированной системы путевого хозяйства) [102].

Этапы развития путевого комплекса показаны на рисунках 2.11-2.13.

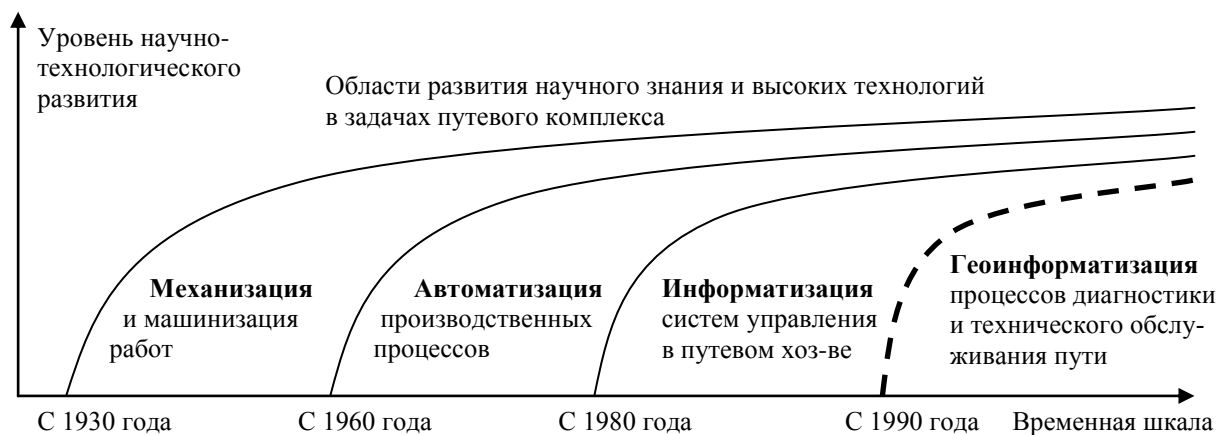


Рисунок 2.11 – Основные этапы развития научного знания и высоких технологий в путевом комплексе (период 1930-2000гг.)

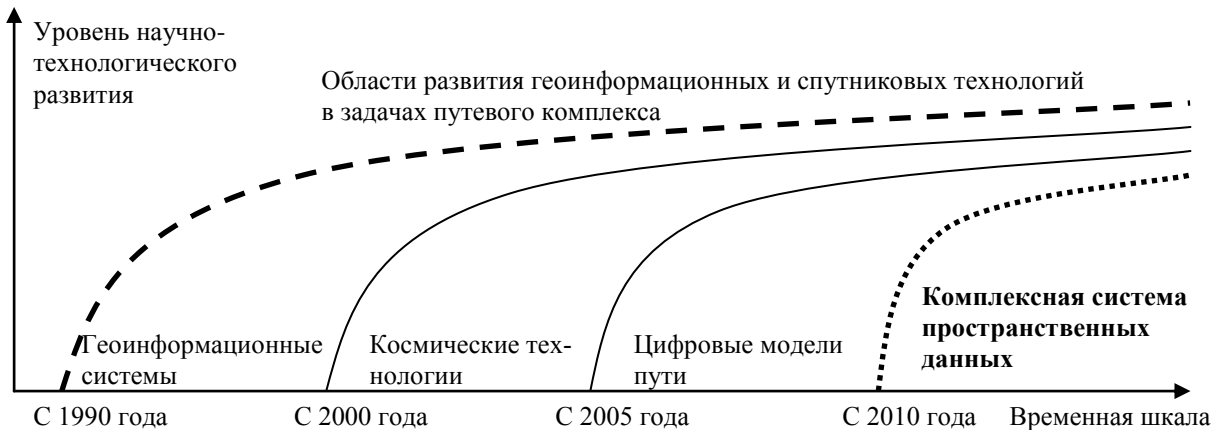


Рисунок 2.12 – Основные этапы развития научного знания и высоких технологий в путевом комплексе (период 1990-2010 гг.)

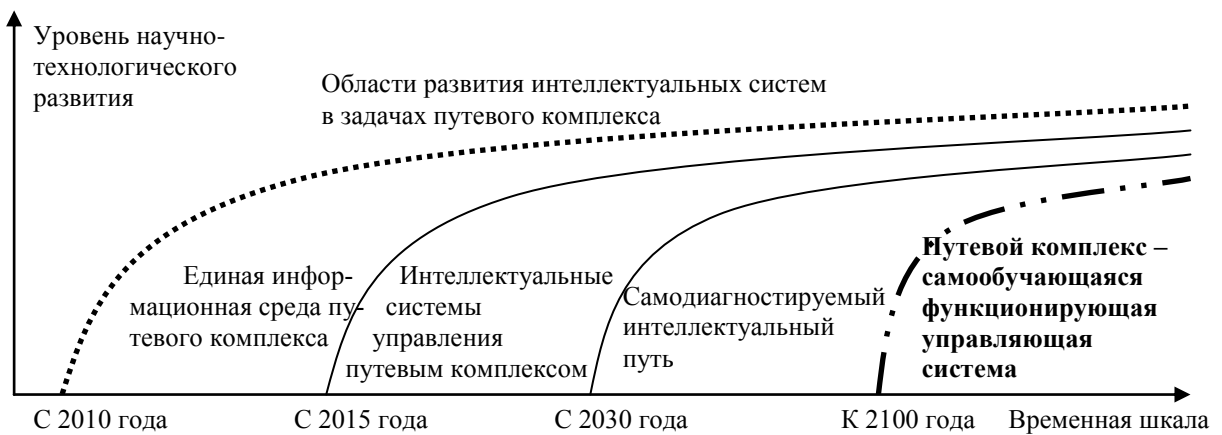


Рисунок 2.13 – Прогнозирование дальнейшего развития научно-технического знания и высоких технологий в путевом комплексе (период 2010-2100 гг.)

Рассматривая этапы развития системы ведения путевого хозяйства можно сделать вывод, что идет непрерывный процесс интеграции методов и средств мониторинга и предупреждения ЧС в единую информационно-управляющую систему [75, 211, 212]. Наглядно это демонстрирует эволюция методов и средств диагностики появлением перспективных аппаратно-программных средств для определения новых и уточнения традиционно измеряемых параметров железнодорожного пути [220] (рисунок 2.14).

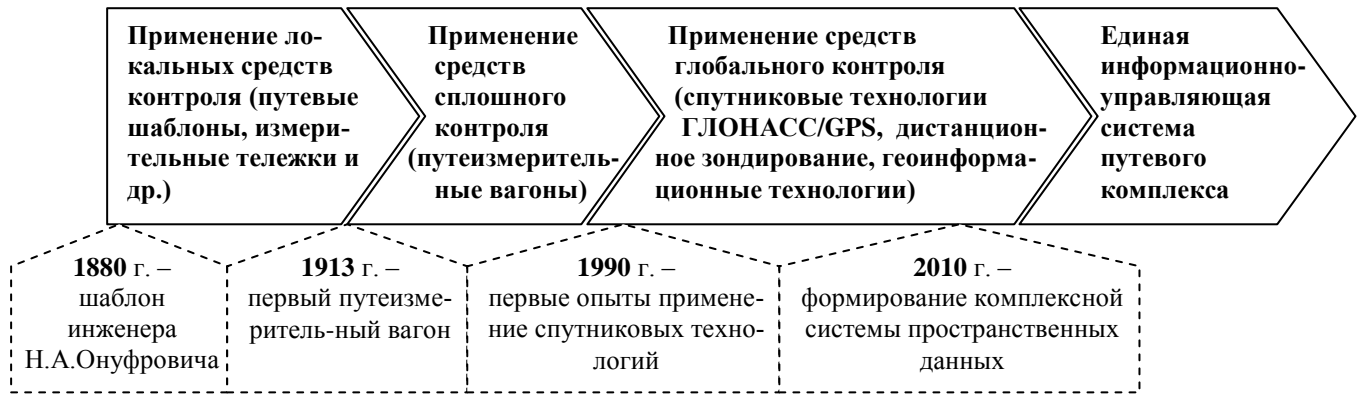


Рисунок 2.13 – Этапы эволюции методов и средств мониторинга пути и предупреждения ЧС

Принципиальным отличием средств глобального контроля является возможность оценки состояния железнодорожного пути в макротерриториальном масштабе, в единой системе координатно-временных измерений [142].

Одновременно с технологическим развитием наблюдается постепенная интеграция национальных железнодорожных систем в единую мировую транспортную систему [76], которая требует единого научно-технологического подхода к вопросам мониторинга и технического обслуживания железнодорожного пути и, в первую очередь, унификации методов измерений, форм представления информации и нормативных требований к ее полноте и точности [138, 139].

Все большее распространение приобретает на сети железных дорог России зарубежный подвижной состав, в первую очередь скоростные и высокоскоростные поезда компаний Сименс, Альстом, АнсальдоБреда (Финмекканика). Их эффективная и безопасная эксплуатация требует обобщения и интеграции зарубежного и российского опыта по содержанию железнодорожного пути, а также нормативных требований к его техническому состоянию и, в первую очередь, геометрическим параметрам рельсовой колеи.

Путем сопоставления отечественной и зарубежной систем ведения путевого хозяйства выявлены основные противоречия [195], замедляющие взаимную интеграцию и научно-технологическое развитие (таблица 2.1) путем анализа ряда отечественных и зарубежных нормативов (Европейский стандарт DIN EN 13848;



стандарт DB RIL 821; нормативы железных дорог Польши и Китая, содержащиеся в памятках ОСЖД; нормативы железных дорог Финляндии «Технические правила и нормы эксплуатации железных дорог (РАМО)»; нормативы железных дорог Австрии DS 820; Инструкция по техническому содержанию железнодорожного пути ЦП-774; Инструкция по техническому обслуживанию и эксплуатации сооружений, устройств, подвижного состава и организации движения на участках обращения скоростных пассажирских поездов, утвержденная МПС РФ 19.07.1996 г. №ЦРБ-393; дополнительные нормативы по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения», утвержденные 20 декабря 2010 г. Распоряжением ОАО «РЖД» №2650р.

Таблица 2.1

<b>Ключевые интеграционные факторы</b>	<b>Российская система ведения путевого хозяйства</b>	<b>Зарубежные системы ведения путевого хозяйства (Германия, Австрия, Польша, Китай)</b>
Выполнение требования единства норм и стандартов в системе ведения путевого хозяйства	Присутствует разделение норм и стандартов по содержанию и устройству железнодорожного пути для: <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Высокоскоростного движения (<math>V &gt; 201</math> км/ч);</li> <li>2) Скоростного движения (<math>140</math> км/ч <math>&lt; V &lt; 200</math> км/ч);</li> <li>3) Нескоростного движения (<math>V &lt; 140</math> км/ч).</li> </ol>	Нет существенных различий концепций создания норм и стандартов по содержанию и устройству в зависимости от скоростей движений.

Продолжение таблицы 2.1

<b>Ключевые интеграционные факторы</b>	<b>Российская система ведения путевого хозяйства</b>	<b>Зарубежные системы ведения путевого хозяйства (Германия, Австрия, Польша, Китай)</b>
Принцип измерений геометрических параметров рельсовой колеи	<p>Применяется хордовая система измерений неровностей в пикетажной (линейной) системе координат, и как следствие искажения реального положения пути.</p> <p>В качестве измерительной базы выступает колесная база вагона, и как следствие, длина хорды в среднем составляет 20 м.</p>	<p>Применяются системы измерений натуральных неровностей в глобальной (трехмерной) системе координат, которые затем преобразуются различными измерительными хордами.</p> <p>В качестве средства измерений выступает инерциальная измерительная система.</p>
Возможность унификации измерительной информации и нормативных требований	<p>Нормативы Европейского союза предусматривают оценку измерений величин профильной неровности относительно среднего значения, а российские – разность положения двух колес на одном рельсе. Следствием является принципиальное различие в нормировании измерений положения пути.</p> <p>В Российской системе ведение путевого хозяйства нормируется разность смежных стрел изгиба при длинных неровностях до 20 м и до 40 м.</p> <p>На Европейских дорогах нормируется отклонение каждой точки от среднего положения, что обеспечивает более плавный характер кривой.</p>	

Основной вывод по таблице 2.1 – отечественную систему контроля необходимо дополнить системой контроля отклонений пути от паспортного или среднего положения, причем это среднее положение должно определяться с учетом возможности постановки в исходное положение.

### **2.3 Перспективы развития комплексной оценки состояния железнодорожного пути с учетом новых аэрокосмических средств мониторинга**

Принятое и введенное в действие с 15 июня 2012 г. Положение о системе ведения путевого хозяйства определяет общие принципы, технические параметры и нормативно – технические требования к системе ведения путевого хозяйства в современных и перспективных условиях эксплуатации пути, связанных с повышением грузонапряженности, степенью заполнения графика движения, с введением в обращение грузовых поездов с повышенной массой и длиной, осевыми нагрузками, скоростных пассажирских поездов и др.

Действующее положение построено по принципу конечных элементов, когда вся система ведения путевого хозяйства разбивается на категории обобщенных понятий, которые регламентируют то или иное состояние пути и мероприятий которые следуют из этого состояния [155].

Руководство по комплексной оценке состояния участка пути (километра) на основе данных средств диагностики и генеральных осмотров пути введено в действие с 1 января 2010 г. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2009 г. №2536р.

Руководство принято с целью повышения качества содержания пути, определения эффективности мероприятий [229] по его техническому обслуживанию и ремонтам, оперативного назначения работ по фактическому состоянию технических средств объектов пути на основе данных диагностических средств и результатов генеральных осмотров.

Рассмотрим ключевые элементы действующего положения о комплексной оценке [129,130, 131] и перспективы его развития (таблица 2.2).

Таблица 2.2

	<b>По действующему положению</b>	<b>Перспективы развития</b>
<b>Задачи</b>	<p>а) Оценка состояния пути и разработка мероприятий по его техническому обслуживанию, прогнозирования состояния и ремонтом;</p> <p>б) Оценка качества работы предприятия путевого хозяйства по техническому обслуживанию пути на всех уровнях управления.</p>	<p>Путь необходимо оценивать как комплексную территориально-распределительную систему, и оценивать как состояние пути, так и прилегающие территории. Причем оценка должна производиться как с точки зрения влияния пути на прилегающие территории, так и путь.</p>
<b>Основание оценки</b>	<p>а) Результаты средств диагностики пути;</p> <p>б) Акты весенних и осенних генеральных осмотров пути по параметрам не определяемым диагностическими средствами;</p> <p>в) Технический паспорт дистанции;</p> <p>г) Первичная документация, ведущейся на околотках, участках и дистанциях пути.</p>	<p>Оценка должна производиться по динамической модели, имеющая прогнозную составляющую и историческую составляющую, т.е. «истории болезни каждого километра».</p> <p>При этом необходимо ввести некие абсолютные параметры пути, в соответствии с рядом факторов.</p>
<b>Периодичность</b>	2 раза в год (после весенних и осенних генеральных осмотров).	Оценка комплексных параметров пути и прилегающих территорий (полос отвода) необходимо вести непрерывно на основе всех имеющихся и перспективных средств мониторинга [221].

## Продолжение таблицы 2.2

	<b>По действующему положению</b>	<b>Перспективы развития</b>
<b>Критерии оценки</b>	<p>а) Действующая нормативная документация;</p> <p>б) Учет взаимосвязанных факторов по ГРК и состоянию ВСП.</p>	<p>Учет отклонений параметров пути необходимо вести от «абсолютного оптимального состояния и положения пути», определяемого в зависимости от условий функциональности и воздействия природно – технического характера [134].</p>
<b>Объекты оценки (конечные элементы дифференциации)</b>	<p>а) Километры главных путей;</p> <p>б) Съезды главных путей;</p> <p>в) Съезды не главных путей;</p> <p>г) Станционные пути;</p> <p>д) Стрелочные переводы;</p> <p>е) Искусственные сооружения по утвержденному перечню;</p> <p>ж) Участки пути длиной 5-10 км в одинаковых условиях эксплуатации, обслуживаемые одним подразделением, отдельные километры и участки пути, короче километра, например, отдельные кривые с повышенной интенсивностью расстройств.</p>	<p>Железнодорожный путь должен быть представлен как непрерывный объект (цифровая модель пути), который включает все параметры его состояния с высокоточной привязкой к пикетажной и географической системе координат [132]. Причем необходимо рассматривать в перспективе путь, как некое территориально распределенное поле, имеющее в каждой своей точке интегрирующую оценочную характеристику.</p>

Продолжение таблицы 2.2

	<b>По действующему положению</b>	<b>Перспективы развития</b>
<b>Степени оценки</b>	<p>Четырехуровневая степень оценки:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Отличная;</li> <li>2.Хорошая;</li> <li>3.Удовлетворительная;</li> <li>4.Неудовлетворительная.</li> </ol>	<p>Шкала оценки должна быть непрерывной, причем пороговые значения оценки формируются дифференцировано для конкретных участков пролегания пути.</p>
<b>Параметры оценки</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Геометрия рельсовой колеи;</li> <li>2. Параметры кривых участков пути;</li> <li>3. Рельсы и металлические части стрелочных переводов;</li> <li>4. Скрепления;</li> <li>5. Шпалы и стрелочные брусья;</li> <li>6. Балласт;</li> <li>7. Земляное полотно;</li> <li>8. ИССО.</li> </ol>	<p>Параметры оценки исчерпываются локальными параметрами пути, в первую очередь геометрии и рельсовой колеи элементов верхнего строения [133]. Необходимо дополнение данных критериев параметрами состояния окружающих территорий (в действующем положении, все эти факторы считаются форс-мажорными и плановые мероприятия по возможным угрозам не рассматриваются.</p>

Иерархия перспективной системы комплексной оценки состояния пути должна развиваться следующим образом (таблица 2.3).

Таблица 2.3

	<b>Ближайшие перспективы до 10 лет (Стратегия 2020)</b>	<b>Среднесрочные перспективы 25 лет (Стратегия 2030)</b>
<b>Задачи</b>	Оценка состояния пути, <u>включая взаимное воздействие на прилегающие территории</u> и выработка мер по его техническому обслуживанию, прогнозированию состояния и ремонта	Оценка состояния <u>территорий прилегания железнодорожного пути</u> и выработки мер по приведению этого состояния к <u>разработанным нормам</u>
<b>Основание оценки</b>	Оценка производится по непрерывно – актуализируемой модели железнодорожного пути, имеющей прогнозную и историческую составляющую, т.е. «историю болезни каждого километра». Включая параметры каждого воздействия путь – прилегающая территория	Оценка производится по непрерывно – актуализируемой модели <u>территории пролегания железнодорожного пути</u> , имеющей прогнозную и историческую составляющую, т.е. <u>«историю болезни территории пути»</u>
<b>Периодичность оценки</b>	Периодичность оценки назначается исходя из условий эксплуатации, состояния пути и воздействия прилегающих территорий	Периодичность оценки адаптивно меняется и актуализируется исходя из условий эксплуатации, состояния пути и воздействия прилегающих территорий

Продолжение таблицы 2.3

	<b>Ближайшие перспективы до 10 лет (Стратегия 2020)</b>	<b>Среднесрочные перспективы 25 лет (Стратегия 2030)</b>
<b>Критерии оценки</b>	Критерием оценки является эталонное состояние и положение пути «абсолютная ось», и степени отступления от этого состояния для конкретных условий.	Критерием оценки являются эталонное состояние территории пролегания железнодорожного пути, включающее также эталонное состояние и положение самого пути.
<b>Объекты оценки</b>	Интегрально оценивается состояние дискретной точки пути, а путь имеет высокоточную географическую привязку	Оценивается состояние дискретного участка территории прилегания железнодорожного пути, объекты территории и железнодорожный путь имеют высокоточную географическую привязку.
<b>Степени оценки</b>	Формируются дополнительные параметры: а) Угроза прилегающей территории; б) Угроза природно-техногенного воздействия со стороны окружающей среды.	Формируются дополнительные критерии оценки прилегающих территорий, характеризующие изменения, протекающие на прилегающих территориях в состоянии окружающей среды.



Т.е. рассматривая разработанную модель развития комплексной системы оценки можно предположить в перспективе 2 этапа развития [80]:

1. Переход от оценки параметров пути к оценке его состояния в рамках окружающей среды и природно-технических воздействий;

2. Переход к пониманию «путь, как территориального природно - техногенного объекта, оказывающего обоюдное воздействие на территории прилегания» [81].

Исходя из этого понимания происходящих эволюционных процессов в путевом хозяйстве, получаем следующую диаграмму целевого состояния понимания пути (рисунок 2.14).

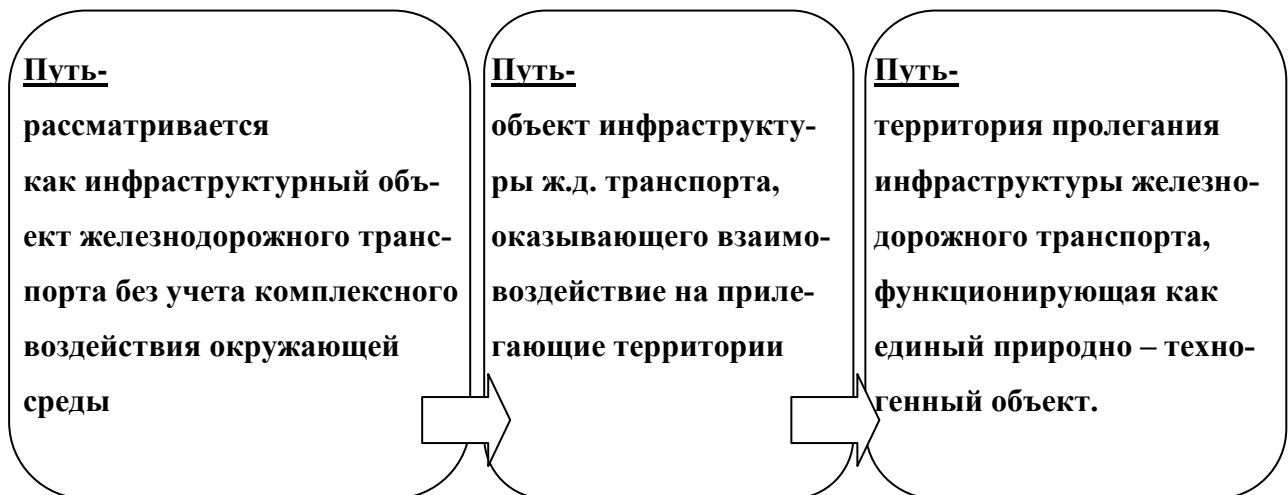


Рисунок 2.14 – Эволюция понятия железнодорожный путь

Таким образом, меняется понимание железнодорожного пути, как объекта линейного к объекту трехмерному, пространственному, с непрерывной оценкой его состояния по идеальной адаптивной непрерывно – актуализируемой модели его состояния и положения в пространстве «абсолютной оси».

## 2.4 Совершенствование системы информационно-технологического мониторинга железнодорожного пути для предупреждения чрезвычайных ситуаций

Существующая система информационно – технологического обеспечения мониторинга железнодорожного пути включает 2 уровня (рисунок 2.15): комплекс локальных инфраструктурных технических решений – реперные сети, путевые шаблоны, геодезическая аппаратура и др. и второй уровень – так называемые средства сплошного контроля (из которых вагон-путеизмеритель является наиболее ярким представителем и осуществляет периодические измерения геометрических параметров рельсовой колеи).



Рисунок 2.15 – Основные технологические проблемы мониторинга

При этом все данные средства дают дискретную и разнородную картину [85, 156, 157], не позволяющую в принципе выстраивать адекватную пространственную модель состояния железнодорожного пути (рисунок 2.15).

Для решения представленных технологических проблем целесообразно применение средств глобального контроля – космических, авиационных и наземных средств дистанционного зондирования с высокоточной привязкой аппаратурой ГЛОНАСС/GPS [38, 39, 158, 159]. Интегрируя результаты исследований, предложена модернизированная структурная схема системы мониторинга протяженных деформаций железнодорожного пути, предусматривающая 4 основных уровня (рисунок 2.16).

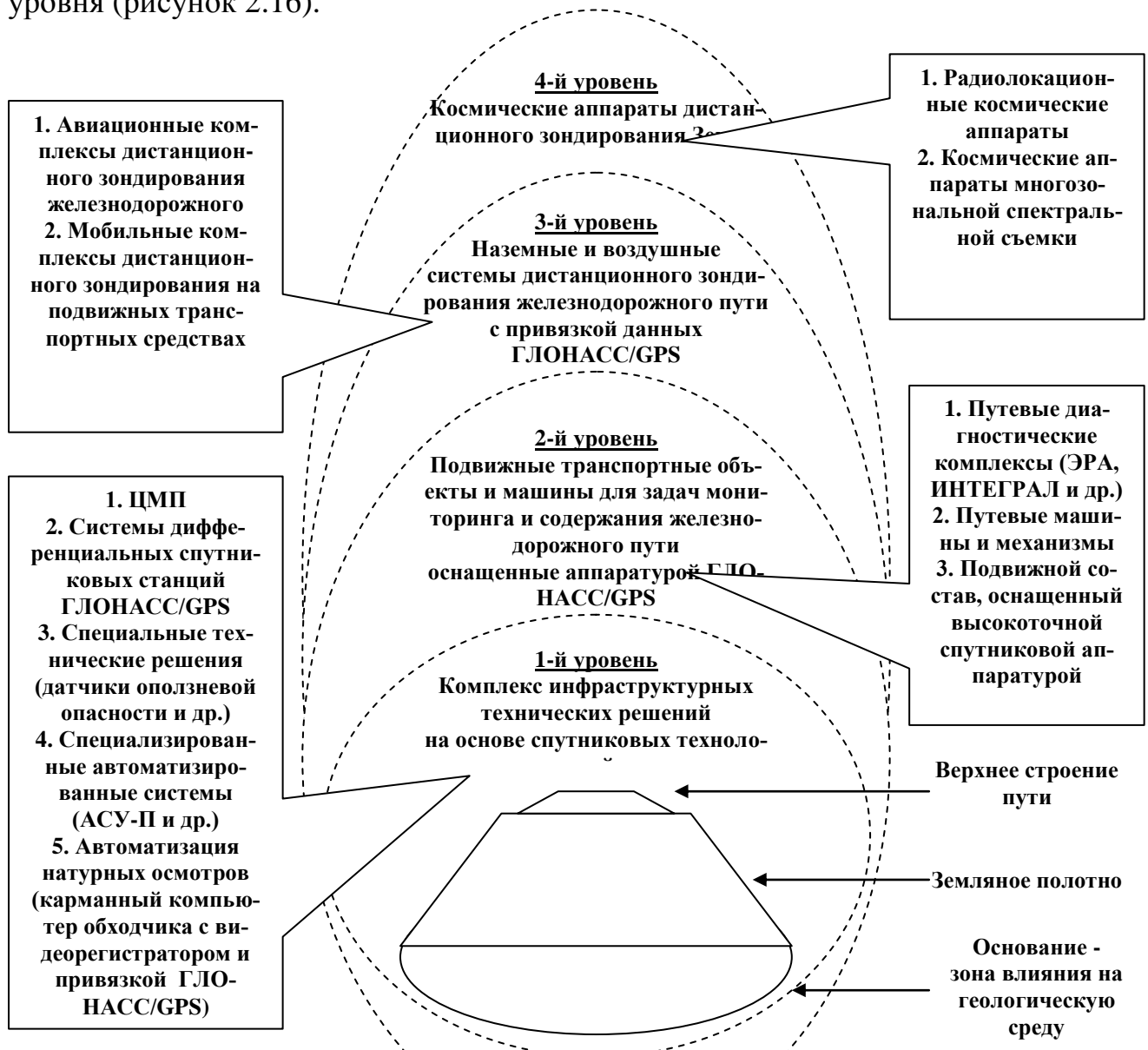


Рисунок 2.16 – Модернизированная система мониторинга

Результаты специальных исследований европейских организаций в области создания единого координатного пространства железных дорог, реализующего принцип «Европа без границ» подтверждают выводы о том, что использование технологий спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS обеспечивают решение задач мониторинга и технического обслуживания железнодорожного пути. Одним из примеров служит широкое использование пространственных данных в инфраструктурном комплексе железных дорог Германии, где информация о пути постоянно актуализируется по результатам технического обслуживания, ремонта и модернизации.

Первым этапом реализации перспективной системы мониторинга пути является формирование единого высокоточного координатного пространства [40] железных дорог (рисунок 2.17 - 1-й уровень) на основе систем спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS и их дифференциальных дополнений.

Вторым этапом является внедрение единой технологии технической диагностики железнодорожного пути (рисунок 2.17 – уровень 2-3) с применением высокоточного спутникового позиционирования [11, 88, 89, 162]. Это позволит оптимизировать сроки проведения путевых работ при повышении их качества, уменьшит число ограничений движения поездов, повысит их скорость, а также позволит экономить финансовые средства на содержание железнодорожного пути (Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утв. МПС России 1 июля 2000г. ЦП-774) [31].

Третьим этапом является внедрение технологии мониторинга железнодорожного пути, искусственных сооружений и негативных природно-техногенных процессов [213, 214], влияющих на безопасность движения на основе современных информационно-измерительных систем и технологий дистанционного зондирования Земли (рисунок 2.17 - уровень 4). Это позволит сократить сложные дорогостоящие инженерно-геодезические работы при технической диагностике искусственных сооружений (Инструкция по содержанию искусственных сооружений. Утв. МПС России 28 декабря 1998 г. ЦП-628) и мониторинге негативных природно-техногенных процессов на железных дорогах (Инструкция по содержанию

земляного полотна. Утв. МПС России 3 марта 1998г. ЦП-544), предупредить возможные аварии и катастрофы на железнодорожном транспорте [82, 160, 161, 209].

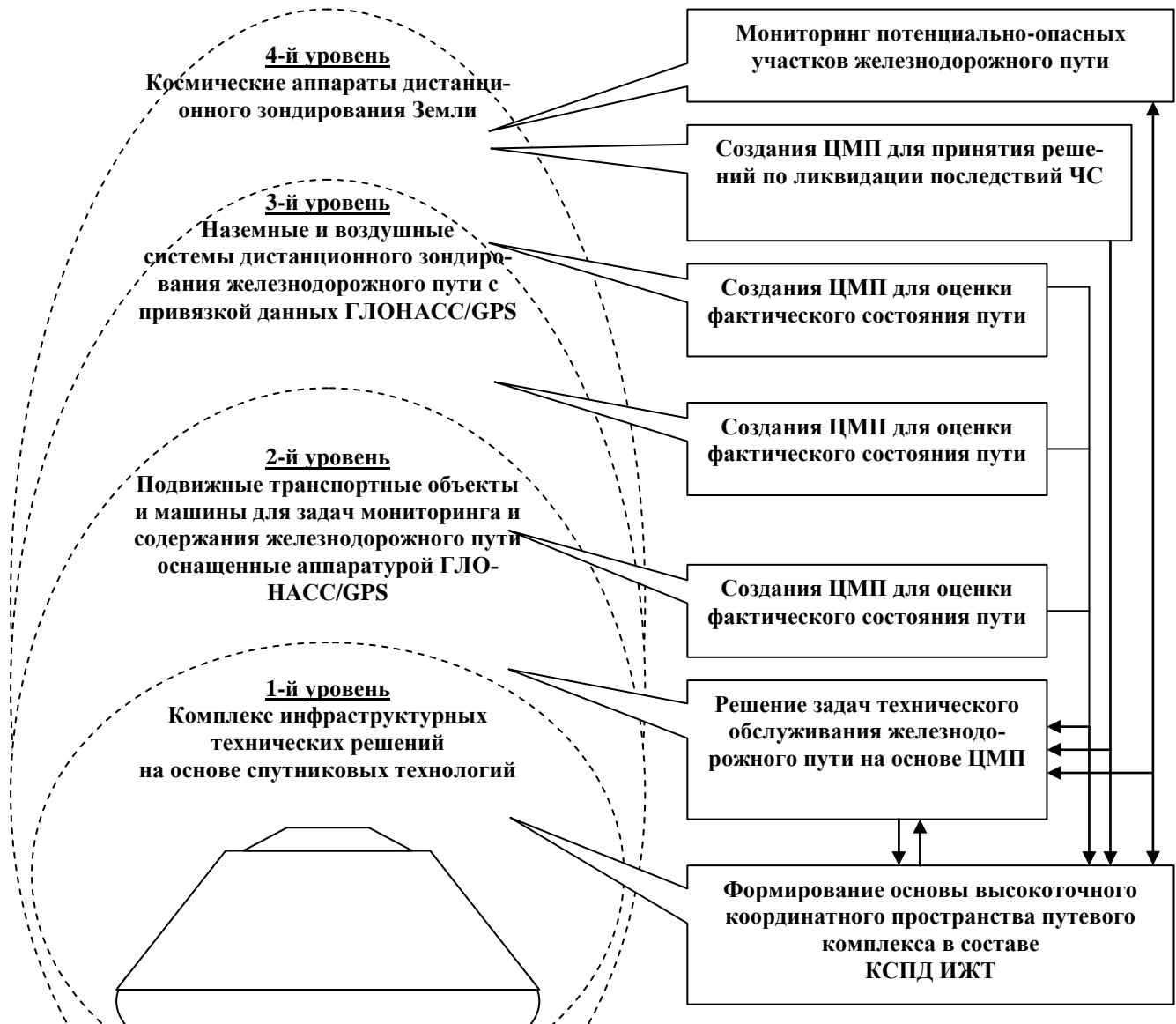


Рисунок 2.17 – Основные задачи каждого уровня перспективной системы мониторинга

Анализируя основные методы оценки оперативной обстановки при ЧС построена иерархическая структура решаемых задач [112, 182, 186] и перспективной технологии мониторинга ЧС (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18

Для путевого хозяйства возникают следующие новые технологические возможности оценивать геометрические параметры пути в комплексе с объектами инфраструктуры [112]:

- оценка пространственного положения и геометрических параметров железнодорожного пути в комплексе с искусственными сооружениями [77] в макротерриториальном масштабе (смещение насыпей, приближение/удаление ИССО и т.д.);

- адаптивное управление мониторингом [79] и текущим обслуживанием пути (управление частотой контроля при мониторинге, меньшее время для устранения дефектов путем прямой передачи со средств контроля на путевые машины информации, управление скоростью работы путевых машин во время ремонтов и т.д.);

- выявление эпицентров потенциально-опасных явлений на больших площадях, прилегающих к железнодорожному пути (образование водоемов, скорость роста оврагов в сторону пути, обводнение и заболачивание почв и т.д.) [2,3,4,5,103].

Разработанная концепция информационно-технологического совершенствования системы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути на основе новых инновационных технологий одобрена в рамках Семинара Россия – Европейский союз (ЕС) по исследованиям в области железнодорожного транспорта 2012 года [113].

### 3 Разработка аэрокосмических методов оперативного мониторинга и предотвращения ЧС

#### 3.1 Преимущества аэрокосмических методов дистанционного зондирования при мониторинге железнодорожного пути

Приведем методы и средства определения геометрических характеристик железнодорожного пути (таблица 3.1), а также преимущества дистанционного зондирования для определения геометрических характеристик железнодорожного пути, опишем разработанную методику определения геометрических характеристик железнодорожного пути.

Таблица. 3.1

	Классические методы определения геометрических параметров пути		Аэрокосмические методы дистанционного зондирования
	Геодезическая съемка	Вагон-путеизмеритель	
Основные преимущества	Позволяет проводить съемку пути с высокой точностью на небольшом участке пути с привязкой к глобальной системе координат. Возможность определения геометрических параметров объектов на территориях прилегающих к железнодорожному пути [151].	Позволяет проводить съемку железнодорожного пути с высокой производительностью на участке пути большой протяженности. Диагностические комплексы «ЭРА» и «Интеграл» имеют возможность съемки полосы отвода на расстоянии до 50 м.	Позволяет проводить съемку железнодорожного пути на протяженных участках с привязкой к глобальной системе координат [42, 61, 90] в широкой полосе местности (до десятков километров) прилегающей к магистрали.



Продолжение таблицы 3.1

	<b>Классические методы определения геометрических параметров пути</b>		<b>Аэрокосмические методы дистанционного зондирования</b>
	<b>Геодезическая съемка</b>	<b>Вагон-путеизмеритель</b>	
<b>Основные недостатки</b>	Съемка требует длительных и дорогостоящих полевых измерений с использованием большого количества персонала высокой квалификации и сложного геодезического оборудования [151], а также сложную и длительную камеральную обработку.	Измерения имеют относительный характер, т.к. ведутся в пикетажной системе координат. Кроме того, измерения производятся относительно геометрического базиса самого вагона, что приводит к невозможности измерения и измерение с искажением ряда геометрических параметров [137].	Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования, требует специально подготовленного персонала [147].

Спектр геометрических неровностей железнодорожного пути очень широк и содержит волны длиной от долей метра до километров. С позиции обеспечения безопасности движения поездов при скоростях до 140 км/ч наиболее значимыми являются неровности средней длины от 2-3 м до 40-50 м. При увеличении скоростей на безопасность движения начинают влиять более длинные неровности:

- для скоростей до 200 км/ч необходимо учитывать и оценивать неровности в плане и профиле длиной до 60-70 м;
- для скоростей до 250 км/ч необходимо учитывать и оценивать неровности в плане и профиле длиной до 100 м.

Традиционным представлением неровностей рельсовой колеи в вертикальной и горизонтальной плоскости является их отображение стрелами изгиба от скользящей вдоль пути хорды. Такие схемы применяются в измерительных системах вагонов-путеизмерителей и путевых машин [148, 149, 150]. В различных путеизмерительных системах применяются симметричные и несимметричные хорды разной длины, как правило, от 10 до 25 м. Хордовые измерения обладают фильтрующими свойствами, отображая только часть спектра (в зависимости от длины и средней точки хорды). Измерительные системы с наиболее распространенной хордой 21,4 м с расстоянием до средней измерительной точки 4,1 сглаживают и искажают неровности короче 6 м и длиннее 30 м, что хорошо видно из амплитудно-частотной характеристики системы.

### **3.2 Методика распознавания и определения геометрических параметров железнодорожного пути**

Для автоматизированного распознавания железнодорожных путей на снимках разработана методика, основанная на детектировании прямолинейных объектов с использованием преобразования Хока [25, 26, 27, 41, 52, 53, 54, 55, 56, 57]. Алгоритм дискретного преобразования Хока основан на разбиении пространства параметров на множество так называемых собирающих элементов, характеризующихся дискретными значениями  $\varphi$  и  $\rho$ . Первоначально все эти элементы имеют нулевое значение. Затем для каждой точки  $(x_i, y_i)$ , отмеченной на исходном бинарном изображении, используя все возможные  $\varphi_j$ , вычисляются соответствующие значения  $\rho_j = x_i \cdot \cos \varphi_j + y_i \cdot \sin \varphi_j$ . Значения собирающих элементов, соответствующих  $(\varphi_j, \rho_j)$ , увеличиваются при этом на единицу.

Каждая точка на исходном бинарном изображении соответствует синусоидальной кривой единичной яркости на преобразованном изображении  $N$  точек, лежащих на прямой  $\rho_j = x \cdot \cos \varphi_j + y \cdot \sin \varphi_j$ , преобразуются в  $N$  синусоид в параметрическом пространстве, пересекающихся в точке  $(\varphi_j, \rho_j)$ . Чем выше значение

собирающего элемента после окончания преобразования, тем больше точек лежит на прямой с соответствующими параметрами на исходном изображении [49].

Детектирование доминирующих прямолинейных объектов осуществляется с использованием вектора однородности распределения яркости в столбце преобразования Хока [48,49,51]. Этот вектор содержит нормированные величины, численно характеризующие для каждого направления наличие на исходном изображении прямолинейных объектов:

$$O_k = O(\varphi_k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^M H^2(k, m),$$

где  $H(k, m)$  - значение собирающего элемента  $(k, m)$  после преобразования Хока,  $N$  - общее количество точек, отмеченных на исходном изображении.

Предлагаемая методика реализована в виде специализированного программного обеспечения автоматизированного детектирования железнодорожных путей на снимках [224] и идентификации их параметров (рисунок 3.1).

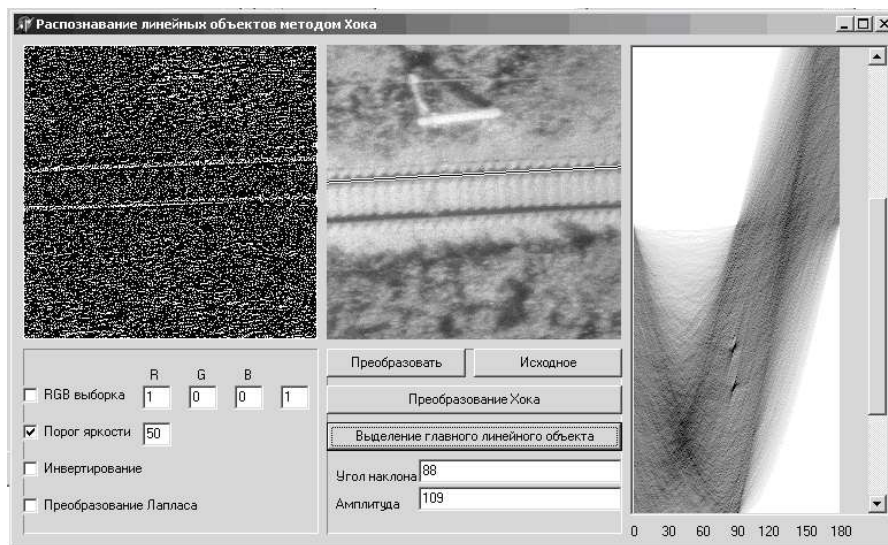


Рисунок 3.1

СКО определения местоположения рельса составляет 0,1 пиксела (1 см) по материалам авиационной цифровой съемки экспериментального кольца ОАО «ВНИИЖТ» [78,87] с пространственным разрешением 10 см (рисунок 3.2).

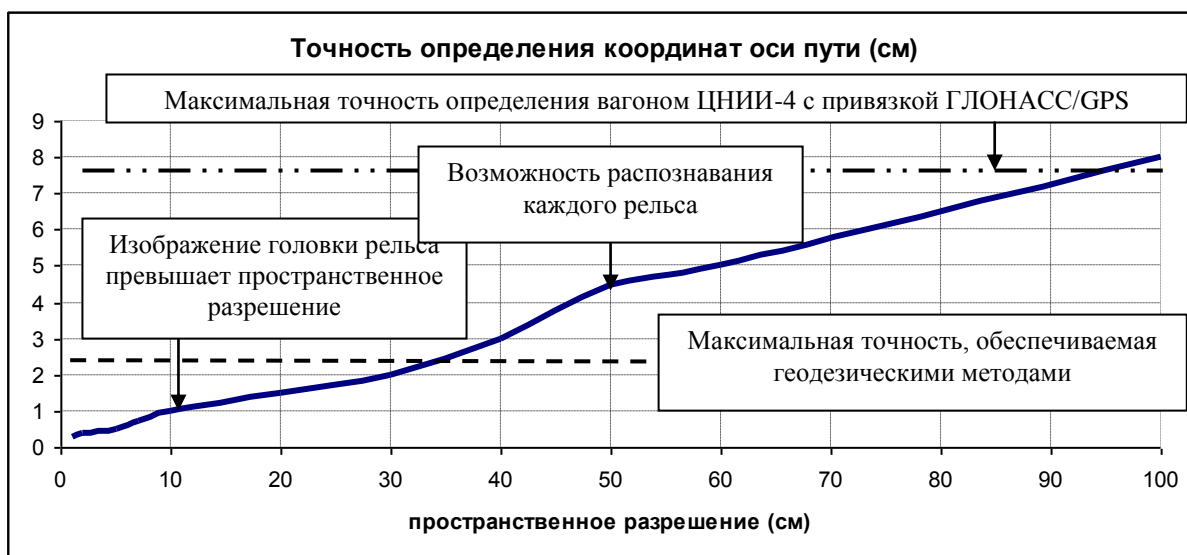


Рисунок 3.2

Распознавание железнодорожного пути с высокой точностью [62, 63] по космическим и авиационным снимкам кроме определения геометрических характеристик железнодорожного пути позволяет строить геометрически оптимальную пространственную модель его проложения («абсолютную ось») [92,93], особенно в местах переходов прямых и кривых участков [41]. Разработанная технология определения геометрически оптимального положения пути основана на распознавании и аппроксимации методом наименьших квадратов измерений координат оси пути на прямых и кривых участках [86] с нахождением отклонения реального положения пути (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3

В качестве оперативного и низкочастотного способа мониторинга геометрических параметров железнодорожного пути на участках целесообразно применять способ съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) - квадрокоптера-дрона [54].

Телевизионная съемка с квадрокоптера позволяет с высокой точностью и оперативностью выявлять изменение геометрических параметров пути одновременно на участке до нескольких сотен метров. Разработанная технология определения геометрических характеристик железнодорожного пути по телевизионным снимкам [64] позволяет определять динамику изменения геометрических параметров длинных неровностей по материалам периодической съемки (таблица 3.2).

Исходя из параметров таблицы 3.2, для современных серийных аппаратов (DJI Phantom 3) оптимальные высоты съемки для выявления длинных неровностей пути составляют 25-100 метров, при которых возможно определение длинных неровностей пути в плане с точностью 1-5 мм.

Таблица 3.2.

Высота съемки (м)	Протяженность измеряемых длинных неровностей (м)	Пространственное разрешение (мм)	Точность измерения геометрических параметров пути в плане (мм)
5	10,7	2,6	0,3
10	21,4	5,2	0,5
<b>25</b>	<b>53,6</b>	<b>13,1</b>	<b>1,3</b>
<b>50</b>	<b>107,2</b>	<b>26,2</b>	<b>2,6</b>
<b>100</b>	<b>214,4</b>	<b>52,4</b>	<b>5,2</b>
250	536,1	130,9	13,1
500	1072,3	261,8	26,2
1000	2144,7	523,6	52,4

Аэросъемочное оборудование БПЛА позволяет вести съемку параллельно железнодорожному пути на высоте головки рельса, что позволяет выявлять просадки железнодорожного пути (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4

Представленная методология определения геометрических характеристик железнодорожного пути реализована при выполнении работы плана НТР ОАО «РЖД»: «Оценка влияния применения в эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 тс на базе определения напряженно-деформативного состояния верхнего строения пути и земляного полотна при воздействии поездов с вагонами с осевой нагрузкой 23,5 тс, 25 тс и 27 тс и интенсивности расстройств пути в эксплуатации от воздействия поездов с вагонами с нагрузкой 27 тс на ось» в 2013-2016 годах на участке Ковдор – Мурманск Октябрьской железной дороги.

### **3.3. Распознавание потенциально-опасных объектов на прилегающих к железнодорожному пути территориях по материалам аэрокосмического дистанционного зондирования**

Разработана технология автоматизированного выявления потенциально-опасных объектов на прилегающих к железнодорожному пути территориях [59, 60], основанная на выявлении аномальных зон с наименьшими значениями когерентности сигнала повторяемых космических снимков (рисунок 3.5) [18, 32].

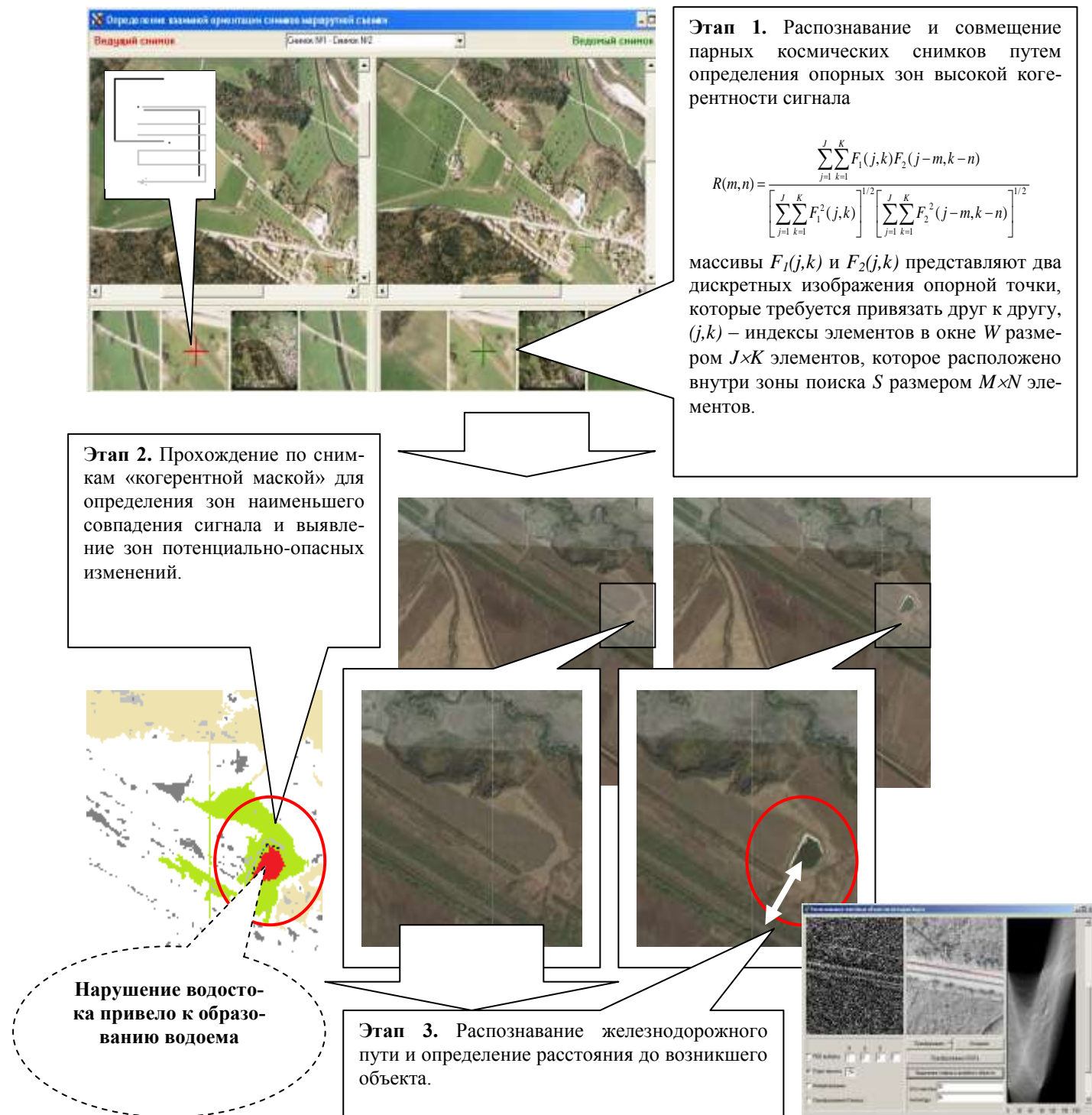


Рисунок 3.5 – Технологическая схема выявления потенциально-опасных изменений прилегающей к железнодорожному пути территории

Объекты земляного полотна (ЗП) идентифицируются на материалах аэрокосмической съемки по набору прямых дешифровочных признаков, основными из которых являются [128, 240]:

- расположенные в центре полотна элементы верхнего строения пути;

- лесные просеки по ширине полосы отвода;

- протяженные склоны насыпей и выемок, расположенные параллельно;

- водоотводные канавы, лотки, кюветы, расположенные у подножия и на бровках склонов насыпей и выемок;

- присутствие закрытых дренажей различных конструкций;

- наличие у границ земляного полотна сооружений, построенных для сохранения от разрушений поверхностными водами (подпорных стен, волноотбойных стен, волногасителей, струенаправляющих дамб, шпор, запруд и других сооружений);

- наличие на склонах выемок укрепительных сооружений (плитных противоразмывных покрытий, отсыпки горной массы, анкерных креплений скальных пород).

- наличие других сооружений для защиты земляного полотна от опасных природных явлений (противоселевых, противооползневых, противолавинных, противообвальных и т.д.).

Для выявления опасных деформаций составлена таблица дешифровочных признаков (таблица 3.3) на основании инструкции по содержанию земляного полотна железнодорожного пути [128].



Таблица 3.3

<b>Опасные деформации ЗП</b>	<b>Дешифровочные признаки по материала аэрокосмической телевизионной съемки (на основании инструкции по содержанию земляного полотна железнодорожного пути [128])</b>
Размывы подтопленных откосов ЗП	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Быстрое течение воды на участках временного или постоянного подтопления;</li> <li>2. Наличие в водном потоке поваленных деревьев, пней, бревен, посторонних предметов;</li> <li>3. Прохождение ледохода на высоких горизонтах подтопления с ударами льдинами, ледяными полями в откосы насыпей или по конструкциям регуляционных и защитных сооружений;</li> <li>4. Появление трещин в швах и конструкциях креплений в откосах ЗП;</li> <li>5. Взбугривание укрепленной поверхности откосов;</li> <li>6. В аварийных случаях - изломы крепления и местные размывы грунта под плитами</li> </ol>
Размывы открытых водоотводов (канав, кюветов)	1. Местные разрушения откосов и дна продольных канав, кюветов, отводных русел от дренажей, в местах соединения (слияния) канав, выпусков воды из канав на поверхность земли с образованием промоин, русел, накопления размывого грунта, деталей крепления дна, откосов, перепадов, гасителей энергии водного потока
Понижения и заплывания водоотводов ЗП на вечномерзлых грунтах	1. Прекращение стока воды и ее застои в водоотводах

Продолжение таблицы 3.3

<b>Опасные деформации ЗП</b>	<b>Дешифровочные признаки по материала аэрокосмической телевизионной съемки (на основании инструкции по содержанию земляного полотна железнодорожного пути [128])</b>
Заиливание кюветов и канав	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отложение глинистых и субпесчаных грунтов на дне кюветов и канав, в первую очередь в местах уменьшения их продольных уклонов;</li> <li>2. Уменьшение глубины водоотводов с уширением их дна</li> <li>3. Заращение канав кустарником, крупностебельными травами, кочкарником;</li> <li>4. При значительном уменьшении сечения канав возможно их переполнение и изливание воды на защищаемую территорию и конструкции пути</li> </ol>
Подмыв берега моря (озера, водохранилища), вблизи ЗП, защитных и берегоукрепительных сооружений	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Образование ниш на уровне горизонта воды с нависанием грунтовых массивов;</li> <li>2. Большая крутизна берегового склона;</li> <li>3. Наличие обрушенных крупных массивов грунта, валунов, поваленных стволов деревьев в зоне прибоя;</li> <li>4. Продольные трещины в береговом массиве, по которым происходит отслоение и обрушение подмытых массивов;</li> <li>5. Искажение первоначальных форм и состояния конструкций крепления берегов, подпорных стен, волноломов, ряжевых и габионных стенок, скальных отсыпок (горной массы)</li> </ol>

Продолжение таблицы 3.3

<b>Опасные деформации ЗП</b>	<b>Дешифровочные признаки по материала аэрокосмической телевизионной съемки (на основании инструкции по содержанию земляного полотна железнодорожного пути [128])</b>
Подмыв основания ЗП водными потоками	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Размыв берега у основания откоса ЗП с отложениями наносов в излучинах и подмывами нижних частей откосов;</li> <li>2. Загромождение русла карчами, валунами, мелким камнем и песком с образованием местных подпоров воды и поднятием ее до верха ЗП;</li> <li>3. При обильных атмосферных осадках, таянии ледников вероятно полное затопление пути с размывами балластного слоя, повреждениями и разрушениями регуляционных сооружений, опор мостов, водопропускных труб;</li> <li>4. При катастрофических паводках возникает угроза безопасности поездов</li> </ol>
Оврагообразование	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Одиночные или разветвленные, вытянутые вдоль промоины с крутыми бортами (откосами) и интенсивно размываемым дном;</li> <li>2. Крутые борта обнажены и на них не успевает прижиться травяная или кустарниковая растительность;</li> <li>3. Поверхности бортов покрыты трещинами, создающими системы столбчатых отдельностей;</li> <li>4. Профиль дна оврага, крутой у вершины, постепенно выглаживается к его устью, где овраг имеет широкое, распластанное дно и более пологие борта, иногда покрытые травой и кустарниками;</li> <li>5. В периоды снеготаяния и выпадения ливней размывается дно оврага и обрушиваются откосы</li> </ol>

## Продолжение таблицы 3.3

<b>Опасные деформации ЗП</b>	<b>Дешифровочные признаки по материала аэрокосмической телевизионной съемки (на основании инструкции по содержанию земляного полотна железнодорожного пути [128])</b>
Завал ЗП снежными лавинами	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Лавинные лога (желоба) по поверхности склона опознаются по отсутствию деревьев;</li> <li>2. Крутизна склона превышает 15° и достигает 35°-45°;</li> <li>3. Накопление снежных массивов при снегопадах и метелях;</li> <li>4. Приток талых и ливневых вод</li> </ol>
Завалы пути селевыми отложениями	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Наличие селеопасных логов, имеющих неустойчивые борты;</li> <li>2. Отложение селевых масс в руслах, на подходах к мостам (валунов, стволов деревьев), при резких поворотах русла селеопасного лога;</li> <li>3. Образование водоемов угрожающих прорывами и прохождением шквальных потоков</li> </ol>
Загромождение пути и подмостовых отверстий наледями	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Нарастание слоев льда в местах выхода на поверхность грунтовых вод, перемерзания постоянного водотока на перекатах;</li> <li>2. Накопление льда у искусственных сооружений (малых мостов, труб);</li> <li>3. Заполнение льдом мелких ложбин, русел временных или постоянных ручьев с постепенным приближением к пути распластанных ледяных полей;</li> <li>4. Периодическое весеннее таяние снега и льда с ночным замерзанием талой воды в кюветах, канавах, лотках, временных отводных канавах</li> </ol>

Продолжение таблицы 3.3

<b>Опасные деформации ЗП</b>	<b>Дешифровочные признаки по материала аэрокосмической телевизионной съемки (на основании инструкции по содержанию земляного полотна железнодорожного пути [128])</b>
Повреждения ЗП при наводнениях	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Интенсивное и продолжительное поднятие уровня воды в близкорасположенных водотоках, водоемах, суходолах, на низменных территориях;</li> <li>2. Переполнение водоотводных сооружений (каналов, лотков, кюветов);</li> <li>3. Затопление регуляционных и защитных сооружений у мостов, на прижимных участках;</li> <li>4. Размывы откосов подтопленного ЗП;</li> <li>5. Размывы и другие разрушения укрепительных сооружений (дамб, креплений откосов и берм, поперечных бун и других конструкций);</li> <li>6. Выход воды на путь</li> </ol>

Применение методов глобального космического мониторинга позволило не только отслеживать геометрические параметры пути на всем участке, но и выявлять возникающие объекты, представляющие потенциальную угрозу для железнодорожного пути (водоемы, возникающие запруды, проводимые природные (мелиоративные) и строительные работы, меняющийся характер водостоков, оврагообразующие процессы и др.) [58], тем самым выявляя зависимость состояния пути от состояния прилегающей территории (рисунок 3.6).

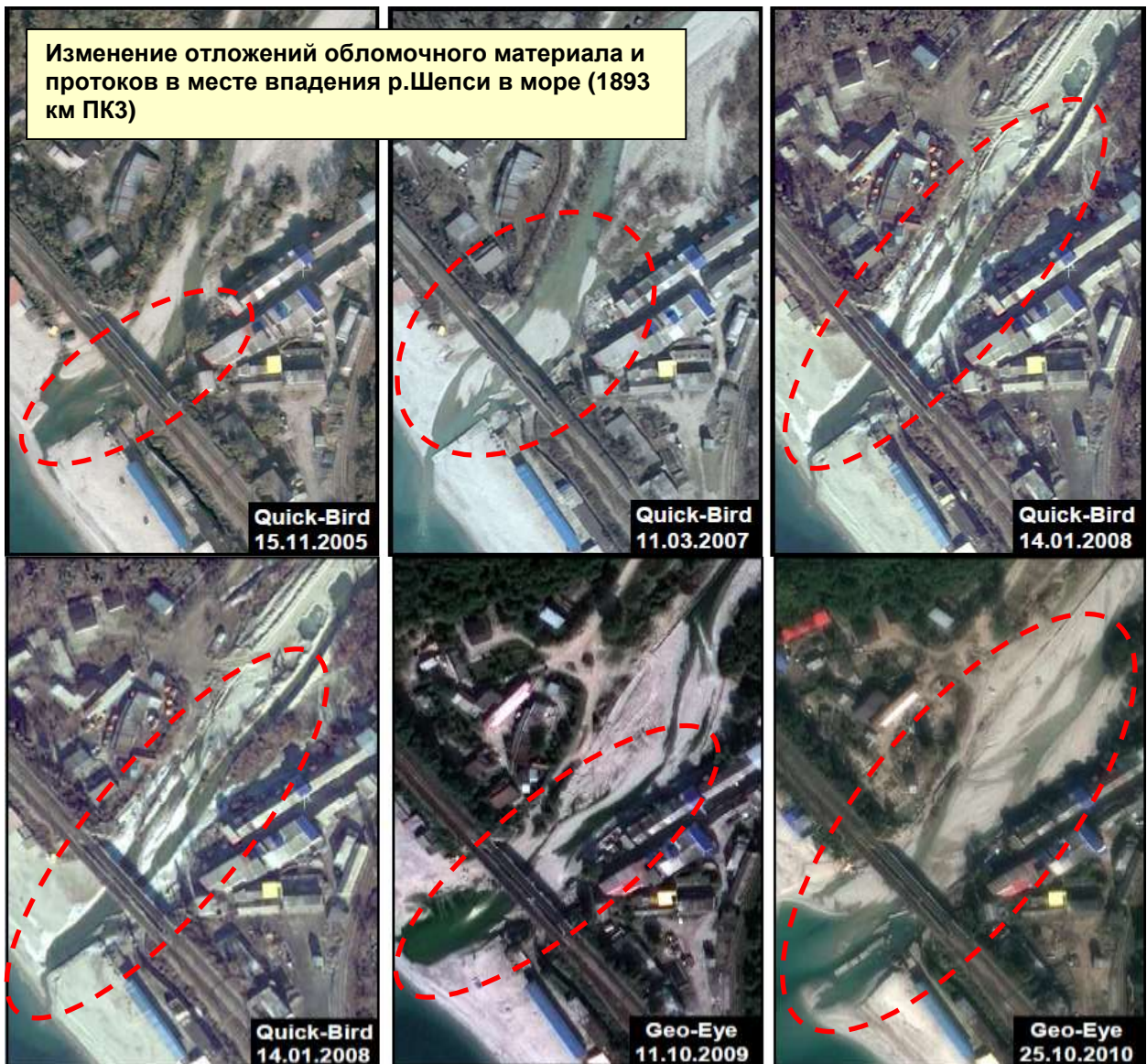


Рисунок 3.6 – Выявление потенциально-опасных явлений на участке Туапсе-Адлер

Рассмотрим потенциально опасный объект (водоем на рисунке 3.7), обнаруженный в непосредственной близости к железнодорожному пути. Т.к. расстояние от железнодорожного пути до водоема незначительно (составляет 50 метров), следовательно, во время таяния снега или выпадения обильных ливневых осадков, этот водоем представляет потенциальную опасность для железнодорожного пути.



Рисунок 3.7 – Потенциально опасный объект (водоем) вблизи станции Белоозерская казанского направления МСЖД

Для оценки возможных последствий, которые может привести разлив водоема, необходимо рассчитать следующие параметры [126]: площадь, величину приближения к железнодорожному пути, а также построить прогнозную модель, в которой определяются вектора изменений границ озера, вычислить изменение площади водоема.

Для вычисления указанных параметров разработана математическая модель [126, 127] и реализован вычислительный алгоритм (рисунок 3.8).

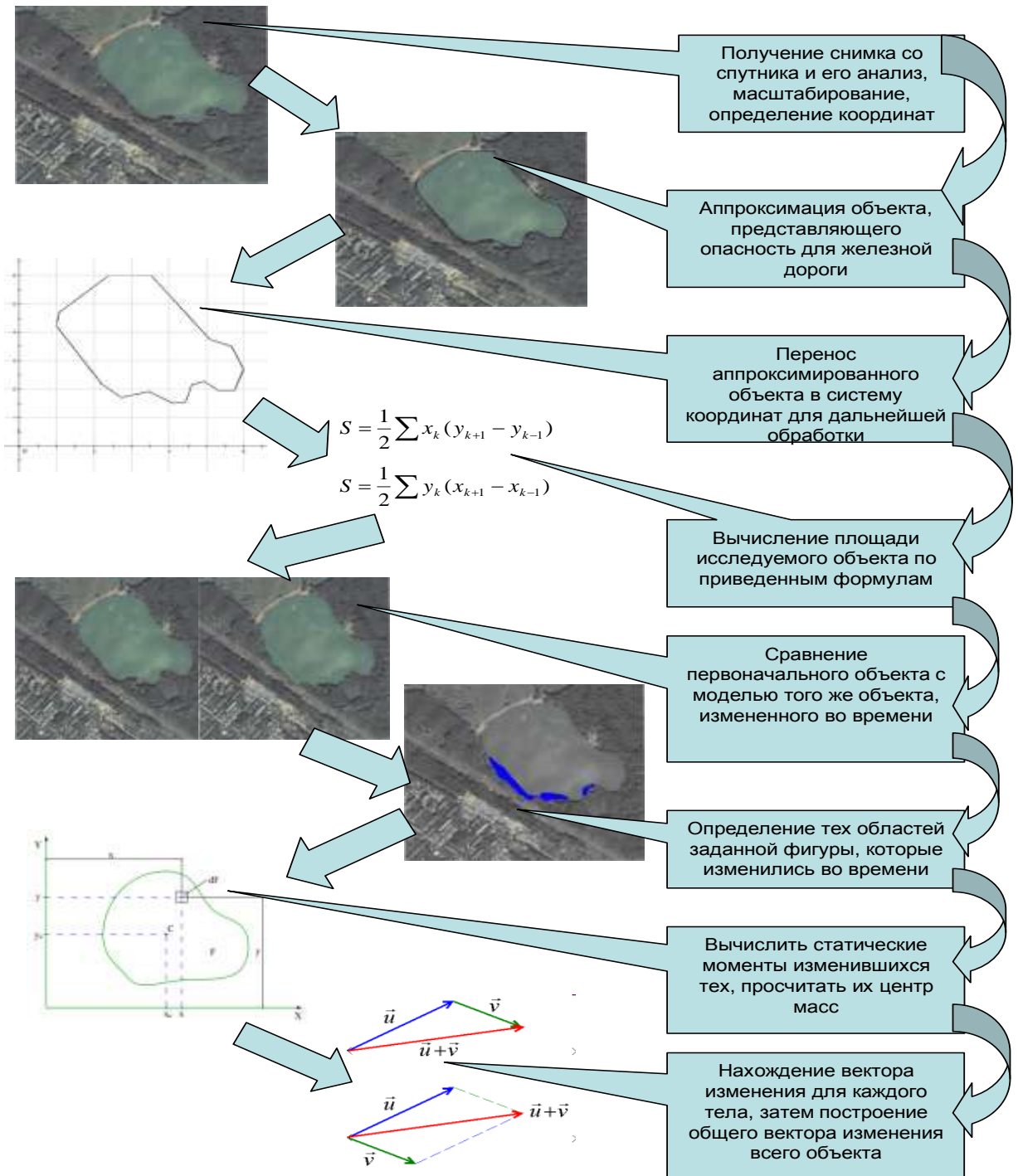


Рисунок 3.8 – Алгоритм расчета параметров потенциально опасного объекта

Применение данного алгоритма позволяет автоматизировать процесс оперативного моделирования развития негативного воздействия на путь, а также спрогнозировать развитие ЧС.

Пример (рисунок 3.9) приведен по материалам сайта <http://www.ecolife.ru/intervju/10435> и не является частью работы автора.



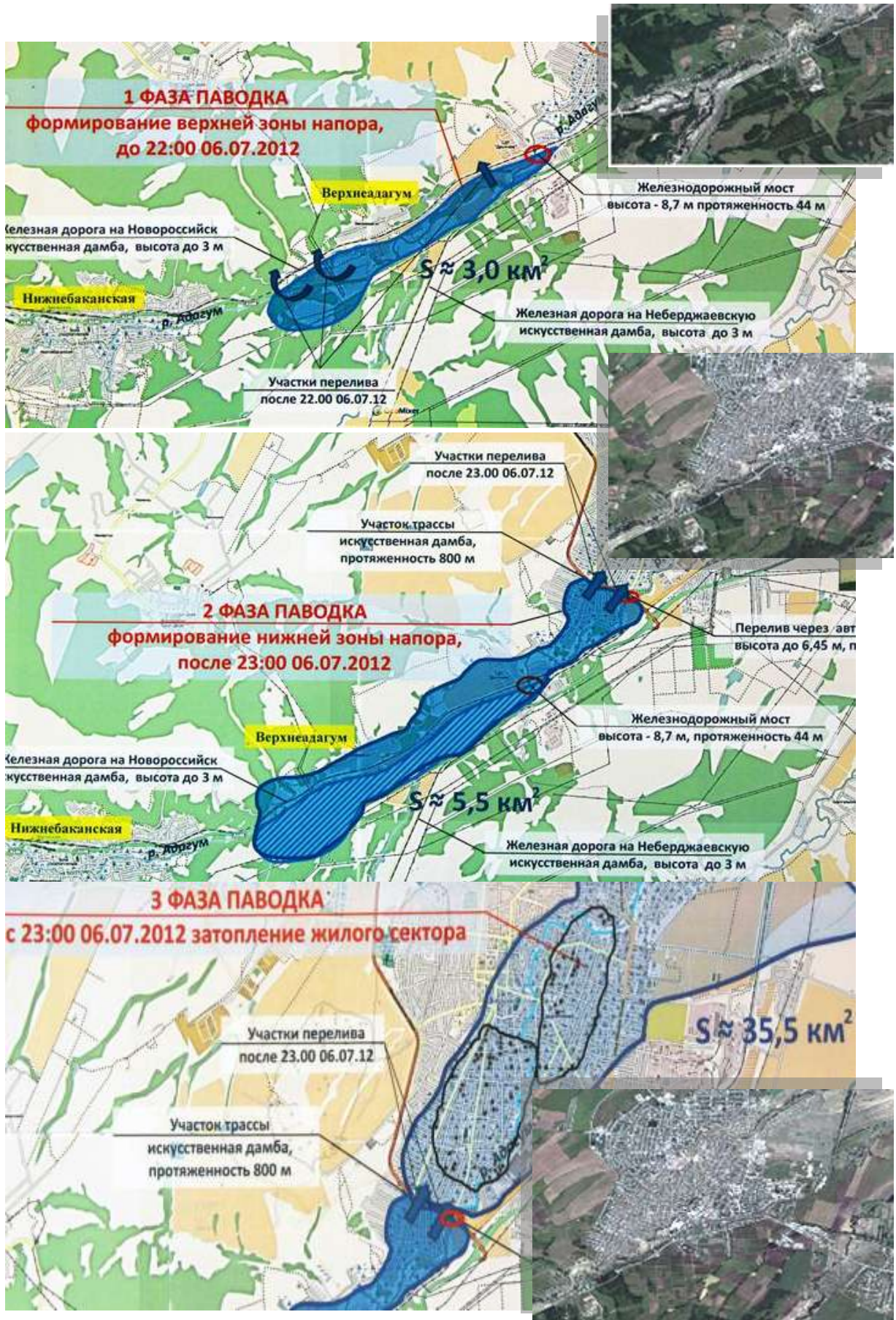


Рисунок 3.9 – Оценка динамики развития паводка

Проводя анализ спутниковой съемки на предмет потенциальной опасности происшествий на железнодорожном транспорте для прилегающих территорий, возможно, ранжировать участки железнодорожного пути на предмет степени опасности распространения последствий аварии (примером такого участка может служить косогорная насыпь в речной пойме, где велика вероятность масштабного загрязнения нефтепродуктами). Принципиальная технологическая схема такой оценки участка железнодорожного пути представлена на рисунке 3.10.

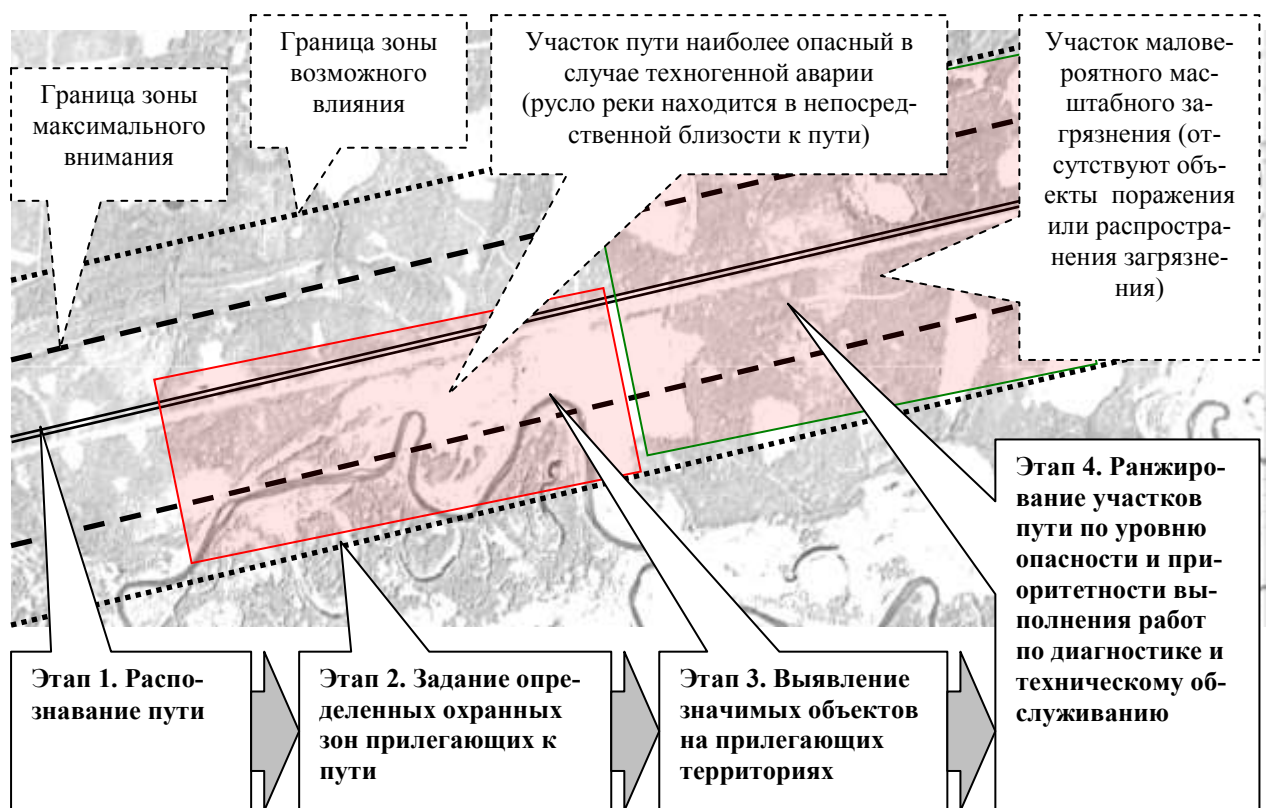


Рисунок 3.10 – Выявление участков наиболее опасных в случае техногенной аварии

Довольно часто катализатором развития геологической деятельности реки направленной на разрушение железнодорожного пути являются овражные выносы [128,240]. Если железнодорожное полотно проложено по пойме реки, развивающиеся овраги с другого берега вызывают изменение местоположения русла реки, которая начинает подмывать насыпь (рисунок 3.11).

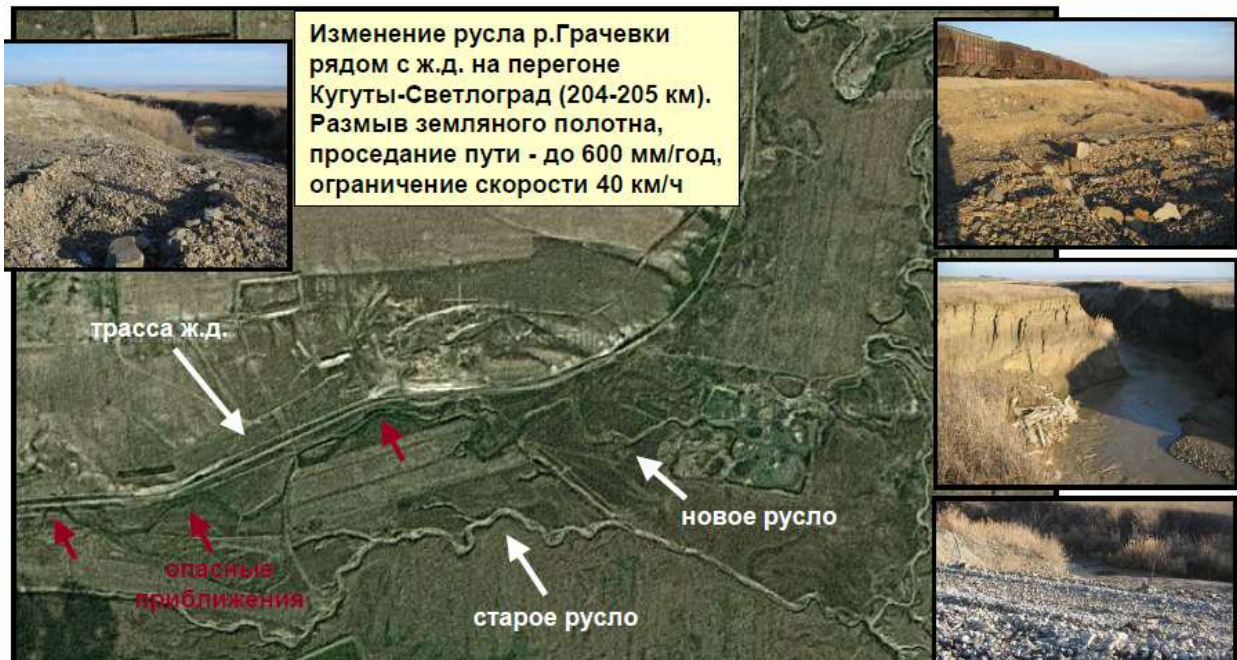


Рисунок 3.11 – Пример появившегося потенциально-опасного участка, как для пути, так и для окружающей экосистемы в случае аварии

Эрозионное расчленение территорий прилегания к железнодорожному пути наносит серьезный вред железнодорожному пути и искусственным сооружениям. Причем ущерб, как сказано выше, может наноситься, как непосредственно развитием самого оврага, в своем развитии подступающим к железнодорожному пути, так и его выносами (рисунок 3.12). В случае упущения развития овражной деятельности и создания опасности аварийной ситуации приходится вкладывать значительные капитальные вложения в строительство объездов и новых искусственных сооружений [240]. Примером такого негативного развития ситуации может служить участок пути между городами Алатырем и Ардатовым, расположенный на Средневолжской возвышенности, когда за сорок лет (1940-1980 гг.) количество инженерных сооружений, выполняющих защитную функцию овражно-балочной деятельности возросло в разы. Данные факты говорят о том, что мониторинг оврагообразующей деятельности и ее развития является одним из важнейших компонентов мониторинга прилегающих к железнодорожному пути территорий.



Рисунок 3.12 – Фрагмент участка пути Алатырь-Арбатов с явными признаками оврагообразующей деятельности

При организации спутникового мониторинга потенциально опасных территорий для железнодорожного пути, подверженных овражно-балочной деятельности важно отслеживать антропогенные явления (рисунок 3.13), довольно часто являющихся причиной активизации природной предрасположенности территорий к оврагообразованию вследствие ряда факторов (рисунок 3.14).



Рисунок 3.13 – Причины эрозии территорий прилегающих к пути на линии Алатырь-Арбатов

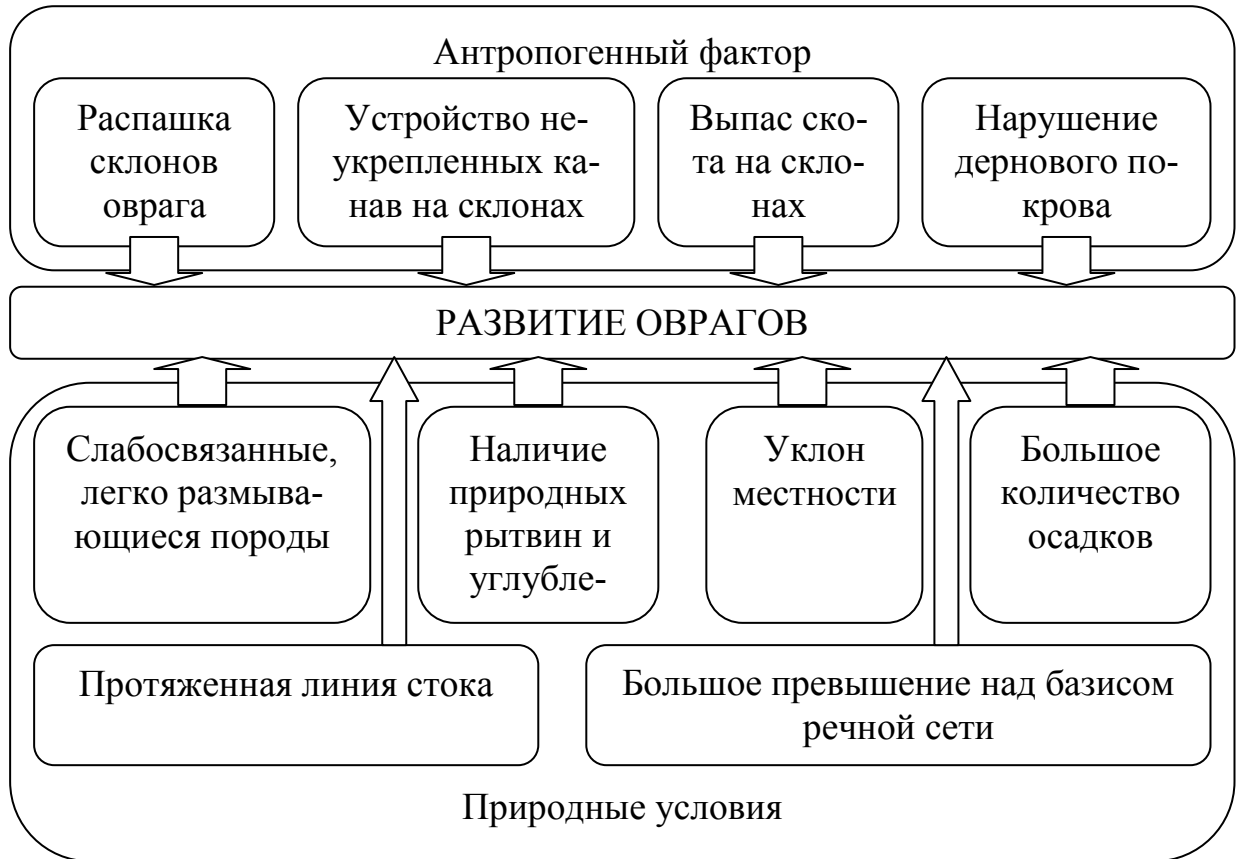


Рисунок 3.14 – Комплекс факторов, приводящих к развитию оврагов

Серьезным фактором негативного природного воздействия на железнодорожный путь и инфраструктуру являются реки. Геологическая работа рек (рисунок 3.15), интенсивность которой во многом зависит от скорости течения, может приводить к размыву и разрушению железнодорожного полотна [128,240]. При этом боковая эрозия является самой опасной формой геологического воздействия рек.



Рисунок 3.15 – Геологическая работа рек

Перенос обломочных и эрозийных материалов, их отложение и накопление, оказывает прямое влияние на боковую и донную эрозию [128,240]. При дистанционном мониторинге важно отслеживать все формы геологического воздействия рек и прогнозировать последствия их развития во взаимодействии (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Результат геологической работы р. Шепси за 2008-2010 гг.

Технология оперативного спутникового мониторинга чрезвычайных ситуаций предусматривает проведение телевизионной спутниковой съемки с увеличенной частотой съемки (до суток во время стремительного развития негативного воздействия на путь, ежемесячного планового мониторинга с целью контроля динамики состояния потенциально-опасных участков и уточнение карты комплексов экзогенных геоморфологических процессов). При этом наземные полевые исследования в рамках технологического процесса спутникового мониторинга проводятся силами дорожных служб только на участках, с наивысшей степенью опасности, а также на участках демонстрирующих негативную динамику.

Возможное расширение функциональных возможностей системы мониторинга железнодорожного пути при практическом внедрении космической съемки при ЧС представлено в таблице 3.4.

Таблица 3.4

<b>Классическая структура системы ведения путевого хозяйства</b>	<b>Предлагаемое расширение функционала системы</b>	<b>Основные новые возможности системы ведения путевого хозяйства космической при использовании системы мониторинга</b>
Классификация путей по скорости движения и грузонапряженности ↓	Особенности территории, потенциально делающие участки пути опасными должны учитываться в классификации пути	Возможность выявления территориальных факторов пролегания пути для присвоения участку пути статуса «потенциально – опасного» и модели возможного развития ЧС
Определение вида и состава работ при техническом обслуживании ↓	Определение вида и состава работ при ЧС на участках определенного класса «опасности»	
Дифференциация железнодорожной сети на участки определенного класса ↓	Участки дифференцируются исходя из анализа территориального фактора воздействия техносферы и окружающей среды	
Комплексная оценка состояния пути ↓	Комплексная оценка включает в себя степень возможного развития ЧС	
Планирование и организация работ	Для каждого потенциально- опасного участка разрабатывается специальный сценарий ликвидации (предотвращения развития) ЧС	Возможность оперативного создания карты развития ЧС в зоне пролегания железнодорожного пути (очаг, зона распространения, и т.д.) для координации действий при ликвидации

Космическая телевизионная съемка является эффективным средством создания ЦМП для принятия стратегических решений по ликвидации последствий ЧС на железнодорожном транспорте [153]. Технология оперативной координатной

привязки космической телевизионной съемки позволяет оперативно получить ЦМП практически одновременно с передачей данных на Землю. Материалы космической съемки и создаваемая ЦМП позволяют оперативно оценить степень разрушения железнодорожной инфраструктуры, оценить протяженность разрушенного железнодорожного пути, спланировать необходимые мероприятия для ликвидации последствий ЧС [190, 191], определить необходимый объем дополнительных сведений о повреждении железнодорожного пути получаемых более локальными методами мониторинга (аэросъемка, наземная съемка, натурный осмотр).

При текущем содержании земляного полотна железнодорожного пути особое внимание уделяется выявлению и дальнейшему контролю неустойчивых участков, при этом, ежегодно на сети дорог происходит несколько десятков случаев неблагоприятного воздействия на путь природно-техногенных факторов, приводящих к негативным последствиям для железнодорожной инфраструктуры.



## **4 Спутниковая технология мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути**

### **4.1 Методика обработки данных космического радиолокационного мониторинга территорий пролегания потенциально-опасных участков железнодорожного пути**

Разработанная технология обработки полученных материалов с помощью дифференциальной радиолокационной интерферометрии представляет собой эффективное средство прямого картографирования подвижек земной поверхности и деформаций сооружений. Принципиальное преимущество дифференциальной радиолокационной (РЛ) интерферометрии перед другими методами мониторинга вертикальных и плановых деформаций заключается в возможности прямой фиксации изменений рельефа, произошедших между съемками, с миллиметровыми точностями.

Технология радиолокационной космической интерферометрии применительно к мониторингу потенциально-опасных участков железнодорожного пути предусматривает периодический контроль районов повышенной опасности в местах прохождения железных дорог по данным радиолокационных космических съемок. Методы радиолокационной космической интерферометрии позволяют на ранней стадии и с высокой точностью выявлять смещения земной поверхности [234], предоставляя тем самым возможность выработки мер по предупреждению аварийных ситуаций.

Технология способствует комплексному и эффективному решению задач оперативного и регулярного мониторинга потенциально-опасных участков железных дорог. Использование технологии позволит повысить надежность, эффективность и безопасность эксплуатации железных дорог в сложных инженерно-геологических условиях.

Разработанная технология базируется на новейших геоинформационных системах [152]. ГИС-проекты позволяют оперативно получать информацию о ста-

бильности (или, наоборот, о нестабильном состоянии) местности, служат основой для составления прогнозов опасных геологических явлений. Рассмотрим технологические операции для дифференциальной интерферометрии по данным, получаемым радиолокаторами с синтезированной апертурой.

Радиолокационная интерферометрия – это метод, позволяющий извлекать информацию о рельефе местности с использованием снимков, зафиксированных двумя разнесенными в пространстве антеннами [6, 241]. Два изображения могут быть получены одновременно антеннами, находящимися на одной и той же платформе (однопроходная, *single-pass* интерферометрия), либо одной и той же антенной, проходящей над анализируемым участком Земли через определенное время (многопроходная, *repeat-pass* интерферометрия). Методика основана на формировании между двумя радарными снимками в комплексном формате интерферограммы, представляющей собой сеть полос, ширина которых соответствует разности фаз. Интерферометрическая РСА (далее – интерферометрия) - это альтернатива традиционной технике для создания цифровых карт высокого разрешения вне зависимости от погодных условий и времени суток при съемке [6].

Рассмотрим две антенны  $S_1$  и  $S_2$  (рисунок 4.1), разнесенных на расстояние  $B$  (*baseline*), направленные на один и тот же участок Земли, на котором, в свою очередь, расположена точка  $P$ . Расстояние от нее до введенных нами антенн -  $R$  и  $R + \Delta R$ , соответственно. Принятые ими сигналы от точки будут различаться (4.1 - 4.2) в зависимости от расстояния [241]:

$$s_1(R) = u_1(R) \exp(i\phi(R)) \quad (4.1)$$

и

$$s_2(R + \Delta R) = u_2(R + \Delta R) \exp(i\phi(R + \Delta R)) \quad (4.2)$$

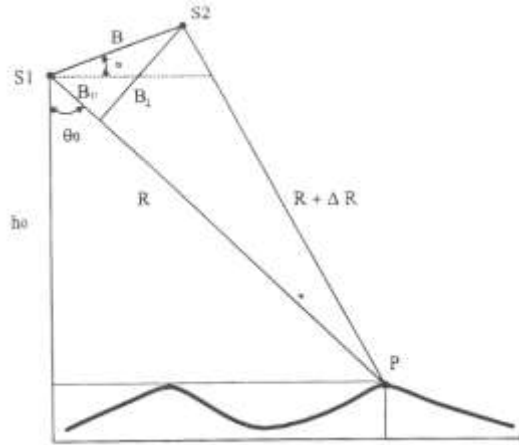


Рисунок 4.1 – Геометрия интерферометрической съемки

Отметим, что функции  $u_1$  и  $u_2$  соответствуют амплитудам принятых сигналов, в то время как экспоненциальные члены отвечают фазам. Фазы принятых сигналов, в свою очередь, состоят из двух частей, одна из которых является случайной (именно поэтому анализ одного пикселя в радиолокационном ДЗЗ не имеет смысла):

$$\phi_1 = 2 \frac{2\pi}{\lambda} R + \arg\{u_1\} \quad \text{и} \quad \phi_2 = 2 \frac{2\pi}{\lambda} (R + \Delta R) + \arg\{u_2\} \quad (4.3)$$

Фактор 2 указывает на двойное прохождение пути волной. Информация о пространственном расположении антенн и соответствующих расстояний позволяет определить положение точки  $P$  в трехмерном пространстве с помощью триангуляции. Принимая во внимание одну и ту же случайную фазовую составляющую на обоих изображениях (т.е.  $\arg\{u_1\} = \arg\{u_2\}$ ), в дальнейшем не рассматриваем ее, и после «перемножения» снимков каждый пиксель комплексной интерферограммы приобретает вид:

$$s_1(R)s_2^*(R + \Delta R) = |s_1s_2^*| \exp(i(\phi_1 - \phi_2)) = |s_1s_2^*| \exp(-i \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R) \quad (4.4)$$

Введем теперь определение интерферометрической фазы:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (4.5)$$

Интерферометрическая фаза может быть определена в интервале от  $-\pi$  до  $\pi$ , но ее действительное значение может выходить за эти пределы. Развертка фазы позволяет восстановить истинное ее значение посредством добавления или вычи-

тания кратного  $2\pi$  числа к фазе  $\phi$  таким образом, чтобы сделать соответствующую фазовую поверхность максимально гладкой:

$$\phi = -i \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + 2\pi N, \quad (4.6)$$

где  $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Изменение  $\Delta R$  может быть измерено с помощью интерферометрической фазы с точностью порядка половины длины излучаемой волны. Таким образом, интерферометрическая техника является более совершенной, чем используемый метод стереообработки, используемый при анализе оптических изображений.

Закон косинуса, примененный к одному из треугольников на нашем рисунке, позволяет выразить искомую величину  $\Delta R$  через известные величины:

$$\begin{aligned} (R + \Delta R)^2 &= R^2 + B^2 - 2BR \cos(\pi/2 - \theta_0 + \alpha) = R^2 + B^2 + 2BR \sin(\theta_0 - \alpha) \rightarrow \\ \sin(\theta_0 - \alpha) &= \frac{(R + \Delta R)^2 - R^2 - B^2}{2BR} \end{aligned} \quad (4.7)$$

где  $\theta_0$  - угол обзора.

Высота  $h$  точки  $P$  дается уравнением

$$h = h_0 - R \cos \theta_0 \quad (4.8)$$

Последние три выражения представляют собой систему трех нелинейных уравнений с тремя неизвестными: углом  $\theta_0$ , изменением расстояния  $\Delta R$  и локальной высотой  $h$ . Таким образом, знание численных значений всех требуемых параметров позволяет установить высоту для каждого пикселя изображения. Далее, применяя информацию о географических координатах территории, получить цифровую модель местности. Точность этой картины обусловлена факторами, о которых будет упомянуто ниже.

Существует несколько критических моментов, затрудняющих достижение удовлетворительного результата. Так, например, необходимость восстанавливать значение интерферометрической фазы [241].

Развертка фазы (рисунок 4.2) является одной из важнейших составляющих в технологической цепочке обработки РЛ данных. Важность этапа состоит в том, что от характеристик того или иного метода, зависит, насколько точный и досто-

верный результат получится на выходе. Точная интерпретация фазы в значительной степени определяет достоверность результата, получаемого по окончании интерферометрического анализа.

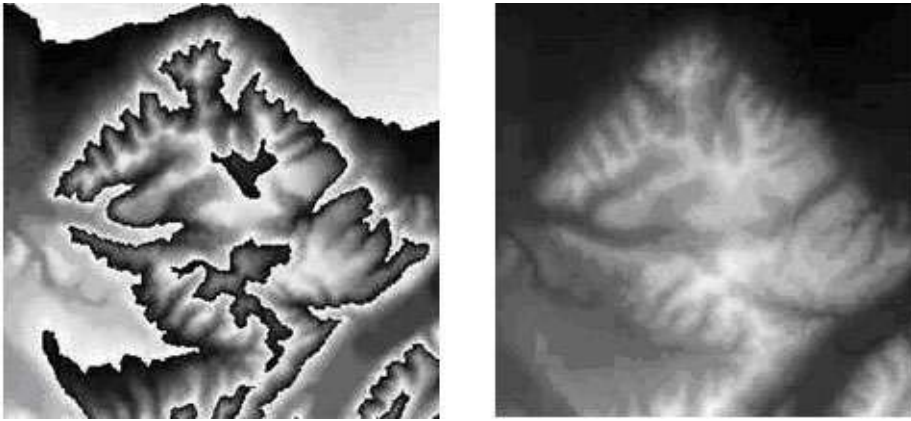


Рисунок 4.2 – Развертка фазы: слева - оригинальная фаза (от 0 до  $2\pi$ ), справа – развернутая

Для интерферометрической обработки существует множество методов обработки фазовых картин, однако отметим, что среди них нет наиболее подходящего: для каждого конкретного случая (а именно: для территории, угла наблюдения, длины волны и пространственного разрешения) необходимо проводить анализ применимости того или иного алгоритма.

Методы развёртки фазы можно условно разделить на глобальные и локальные. Для всех методов первым этапом обработки является оценка вектора локального фазового градиента. Глобальные методы для работы используют все поле фазового градиента. Локальные же методы работают с локальным градиентом [241].

В целом, разностно-фазовая картина, или интерферограмма, содержит значения в диапазоне  $[0, 2\pi)$  радиан. Это связано с тем, что при нахождении фазы комплексного числа используется тригонометрическая функция арктангенс. Именно поэтому разностно-фазовая картина может быть представлена в виде:

$$\varphi(x, y) = \psi(x, y) + 2\pi k(x, y) \quad (4.9)$$

где

$$\varphi(x, y) \in [0, 2\pi);$$

$$\psi(x, y) \in (-L, +L), L > 0 - \text{велико};$$

$$k(x, y) \in \mathbb{Z} - \text{множество целых чисел.}$$

Значения функции  $\psi(x, y)$  называются абсолютными фазовыми значениями, значения функции  $\varphi(x, y)$  – относительными фазовыми значениями. Процедура нахождения функции  $\psi(x, y)$  при помощи известной интерферограммы  $\varphi(x, y)$  носит название развёртки фазы и процедура эта необходима потому, что именно абсолютные фазовые значения используются для нахождения высоты рельефа.

Сделаем одно важное замечание: градиенты функций  $\psi(x, y)$  и  $\varphi(x, y)$  совпадают во всех точках области, за исключением кривых, где функция  $k(x, y)$  меняет своё значение, но эта особенность непрерывного случая перестаёт быть существенной для дискретной постановки задачи.

Обозначим за  $s$  – градиент функции  $\varphi(x, y)$ . Проблема восстановления развёрнутой фазы  $\psi(x, y)$  может быть записана следующим уравнением:

$$\nabla\psi = s \quad (4.10)$$

т.е. необходимо найти функцию абсолютных фазовых значений  $\psi(x, y)$  такую, что градиент её в каждой точке равен градиенту исходной функции  $\varphi(x, y)$ . При такой постановке задачи, можно найти функцию  $\psi(x, y)$  с точностью до константы, одинаковой для каждой точки изображения.

Процедура развёртки фазы представляет собой простое интегрирование градиента вдоль произвольного пути, соединяющего все точки изображения, начиная с некоторой фиксированной точки  $P_0$ . Результат для некоторой точки  $s$  может быть записан в виде:

$$\psi(x_p, y_p) = \psi(x_0, y_0) + \int_{P_0}^P s^* \tau dl \quad (4.11)$$

где  $\tau$  – единичный касательный вектор к траектории интегрирования.

В отсутствие повреждённых шумами участков изображения результат не зависит от пути интегрирования, поскольку в этом случае векторное поле соответствует градиенту развёрнутой фазы и является потенциальным ( $\nabla \times s = 0$ ). При наличии фазовых остатков, т.е. точек, где  $\nabla \times s \neq 0$ , решение зависит от пути и поэтому не является единственным.



Рисунок 4.12 – Процедура развертки фазы

Таким образом, развертка фазы призвана решить проблему фазовой неоднозначности. Интерферограмма до развертки фазы содержит значения фазы в пределах  $[0, 2\pi)$  радиан, в то время, как необходимо знание абсолютного значения фазы. Задача сводится к добавлению нужного числа фазовых циклов к каждому фазовому измерению. Решение задачи осложняется наличием на интерферограмме фазовых шумов и, так называемых, «разрывов» фазы, что делает решение задачи сложным теоретически и ёмким вычислительно [241].

Математически метод наименьших квадратов, реализованный в прототипе ПО интерферометрической обработки РЛ среднего разрешения, описывается следующими уравнениями:

$$\varphi_{ij} = \psi_{ij} + 2\pi k_{ij} \quad (4.12)$$

где  $k_{ij}$  – целое,

$\varphi_{ij} \in [0, 2\pi)$ ,

$$i=0..M-1, j=0..N-1.$$

Поставленную задачу можно решить методом наименьших квадратов, который в данном случае предполагает минимизацию следующей суммы:

$$\sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} (\psi_{i+1j} - \psi_{ij} - \Delta^x_{ij})^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} (\psi_{ij+1} - \psi_{ij} - \Delta^y_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (4.13)$$

где

$$\Delta^x_{ij} = \begin{cases} W\{\psi_{i+1j} - \psi_{ij}\}, i=0..M-2, j=0..N-1 \\ 0, \text{ в других случаях} \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\Delta^y_{ij} = \begin{cases} W\{\psi_{ij+1} - \psi_{ij}\}, i=0..M-1, j=0..N-2 \\ 0, \text{ в других случаях} \end{cases} \quad (4.15)$$

$W\{\}$  – оператор, который переводит аргумент в область  $(-\pi, \pi]$  добавлением или вычитанием некоторого целого числа, умноженного на  $2\pi$ .

Можно показать, что задача о нахождении минимума суммы (4.13) эквивалентна решению следующего дискретного дифференциального уравнения:

$$\psi_{i+1j} + \psi_{ij+1} + \psi_{i-1j} + \psi_{ij-1} - 4\psi_{ij} = \Delta^x_{ij} - \Delta^x_{i-1j} + \Delta^y_{ij} - \Delta^y_{ij-1} \quad (4.16)$$

С граничными условиями Неймана:

$$\Delta^x_{-1,j} = 0, \Delta^x_{M-1,0} = 0, j = 0..N-1$$

$$\Delta^x_{i,-1} = 0, \Delta^x_{i,N-1} = 0, i = 0..M-1$$

Обозначим

$$\rho_{ij} = \Delta^x_{ij} - \Delta^x_{i-1j} + \Delta^y_{ij} - \Delta^y_{ij-1}. \quad (4.17)$$

Тогда

$$(\psi_{i+1j} - 2\psi_{ij} + \psi_{i-1j}) + (\psi_{ij+1} + \psi_{ij-1} - 2\psi_{ij}) = \rho_{ij} \quad (4.2.18)$$

Последнее уравнение есть дискретный вариант уравнения Пуассона на сетке  $M \times N$  и поэтому для его решения может быть применён метод, использующий дискретное косинусное преобразование. Прямое дискретное косинусное преобразование записывается как:

$$C_{mn} = \begin{cases} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} 4x_{ij} \cos\left[\frac{\pi}{2M} m(2i+1)\right] \cos\left[\frac{\pi}{2N} n(2j+1)\right], m=0..M-1, n=0..N-1 \\ 0, \text{ в других случаях} \end{cases} \quad (4.19)$$



Обратное дискретное косинусное преобразование определяется выражением

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_1(m) w_2(n) C_{mn} \cos \left[ \frac{\pi}{2M} m(2i+1) \right] \cos \left[ \frac{\pi}{2N} n(2j+1) \right], \\ 0, \text{ в других случаях} \end{cases} \quad (4.20)$$

$$m = 0 \dots M-1, n = 0 \dots N-1$$

где

$$w_1(m) = \frac{1}{2}, m = 0;$$

$$w_1(m) = 1, m = 1 \dots M-1;$$

$$w_2(n) = \frac{1}{2}, n = 0;$$

$$w_2(n) = 1, n = 1 \dots N-1$$

Запишем искомое решение в виде

$$\psi_{ij} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_1(m) w_2(n) \psi'_{mn} \cos \left[ \frac{\pi}{2M} m(2i+1) \right] \cos \left[ \frac{\pi}{2N} n(2j+1) \right] \quad (4.21)$$

Подставляя последнее уравнение в дискретный вариант уравнения Пуассона, выполняя все необходимые преобразования, в итоге получим:

$$\psi'_{ij} = \frac{\rho'_{ij}}{2 \left[ \cos \frac{\pi i}{M} + \cos \frac{\pi j}{N} - 2 \right]} \quad (4.22)$$

Развёрнутая фаза может быть получена обратным дискретным косинусным преобразованием последнего уравнения.

Метод наименьших квадратов характерен тем, что за сравнительно небольшое время он приближенно решает задачу развертки фазы глобально по всей сцене.

Взаимное «несоответствие» двух снимков вызывает низкое качество получаемой интерференционной картины. Эта величина получила название интерферометрической когерентности. Когерентностью называется коэффициент корреляции двух радиолокационных снимков и, как мера сходства двух изображений, когерентность определяет качество интерферограммы. Она рассчитывается как нормированный результат умножения одного из комплексных изображений интерферометрической пары на другое, комплексно-сопряжённое самому себе:

$$C = \frac{|E(I_1 * I_2^*)|}{\sqrt{E(I_1 * I_1^*)^2 * E(I_2 * I_2^*)^2}} \quad (4.23)$$

где  $E(I_i * I_j)$  – оператор усреднения.

В числителе приведённого выше выражения находится усреднённая амплитуда интерферограммы, а в знаменателе – усреднённые мощности двух изображений, формирующих интерферограмму. Таким образом, интерферограмма является, своего рода, комплексным выражением когерентности.

На практике используется выражение для получения оценки когерентности при помощи усреднения соседних отсчётов интерферограммы, т.е. с некогерентным накоплением сигнала:

$$C = \frac{\left| \sum_{x=0}^{x-1} \sum_{y=0}^{y-1} I_1(x, y) * I_2^*(x, y) \right|}{\sqrt{\sum_{x=0}^{x-1} \sum_{y=0}^{y-1} |I_1(x, y)|^2 * \sum_{x=0}^{x-1} \sum_{y=0}^{y-1} |I_2(x, y)|^2}}, \quad (4.24)$$

где  $x$  и  $y$  – размеры области усреднения по дальности ( $x$ ) и азимуту ( $y$ ).

Оценка делается в предположении постоянства области накопления для каждого элемента массива оценок и эргодичности сигнала (все элементарные отражатели в пределах области накопления не зависят друг от друга и имеют одинаковые статистические характеристики).

Однако, для реальных снимков размер элемента разрешения несколько больше (примерно, в 1.5 – 2 раза), чем расстояние между пикселями, так что соседние пиксели не являются полностью независимыми. В результате, число независимых накоплений  $N_{ind}$  (кадров, number of looks) будет меньше, чем число действительных накоплений:

$$\bar{C}(N_{ind}) > \bar{C}(N)$$

Для того чтобы получить правильную (несмещённую оценку) необходимо найти эффективное число накоплений, с учётом которого несмещённая оценка определяется через смещённую как:

$$\bar{C}(N_{ind}) = \frac{1 - \bar{C}^2(N)}{\sqrt{2N_{ind}}} \quad (4.25)$$

В многопроходной (repeat-pass) интерферометрии основными источниками низкой когерентности и декорреляции является динамика факторов [30] указанных в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Фактор	Характер влияния
Ветер	Движение отражающих элементов лесного покрова (листва, ветви) может дать измененную картину на разных снимках, используемых в дальнейшем для анализа. Короткие волны более подвержены этому эффекту из-за того, что листва и мелкие ветви оказываются «непрозрачными» для них
Влажность	Изменяет диэлектрическую проницаемость среды, что вносит вклад в ошибку фазы при обработке интерферометрической пары [136]
Туман, дождь, роса	Изменяют диэлектрическую проницаемость отражающей поверхности, изменяя тем самым величину отраженного поля на разных, впоследствии сопоставляемых снимках
Температура	Температура, как и влажность, изменяет диэлектрическую проницаемость воздуха, листвы и проч., а также различных геологических объектов
Снег	При наличии снежного покрова на исследуемой местности возникают погрешности в восстановлении информации о ней: из-за изменения температуры и влажности меняется коэффициент отражения, более того, снежный покров является непрозрачным для коротких длин волн
Радарные тени	При съемке горной местности возникает эффект «заслонения» объектами территории позади них вдоль линии наблюдения от сенсора. Таким образом, для его устранения съемку желательно вести под большими углами наблюдения.

Интерферометрическая когерентность варьируется в интервале от 0 до 1, значение  $\gamma = 1$  соответствует случаю, когда сигналы идентичны друг другу,  $\gamma = 0$  - сигналы не коррелируют между собой. Соответственно, достигаемая точность в определении интерферометрической фазы определяется уровнем когерентности между снимками. Кроме артефактов, возникающих в результате обработки данных, низкая когерентность может быть обусловлена шумами оборудования, участвующего в их получении.

Если рассматривать процесс сопоставления снимков более глубоко, то на качество выходного продукта – интерферограммы – безусловно, влияют точность определения траектории полета летательного аппарата, сенсорных параметров и качества применяемых к обработке снимков процедур.

Во многих приложениях интерферометрии необходим подробный анализ полученной интерференционной картины. Для этого рассмотрим снова уравнение (4.22), выразим член  $\Delta R$  для оценки интерферометрической фазы. Пренебрегая квадратичным членом  $\Delta R^2$  в левой части, получим следующее:

$$\Delta R = \frac{B^2}{2R} + B \sin(\theta_0 - \alpha) \quad (4.26)$$

Если расстояние между антеннами  $B$  мало по сравнению с расстоянием до цели  $R$ , как в случае космических систем, когда  $B$  порядка ста метров, в то время как  $R$  достигает нескольких сотен километров, мы можем пренебречь первым членом:

$$\Delta R \approx B \sin(\theta_0 - \alpha) \quad (4.27)$$

Последнее уравнение известно как приближение параллельных лучей. Теперь разложим расстояние  $B$  на параллельную и ортогональную компоненты:

$$B_{\parallel} = B \sin(\theta_0 - \alpha) \quad \text{и} \quad B_{\perp} = B \cos(\theta_0 - \alpha) \quad (4.28)$$

Теперь интерферометрическая фаза приобретает вид:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad (4.29)$$

Она содержит информацию о расстоянии до точки  $P$  и ее высоте. Для большей прозрачности рассмотрим два случая, в первом из которых новая точка  $P'$

расположена на той же самой высоте  $z$ , но на расстоянии  $R + \Delta R$  от сенсора, как это проиллюстрировано на рисунке 4.13 (а).

Угол наблюдения изменится на величину  $\Delta\theta_R$  и, в соответствии с уравнением (4.2.28), интерферометрическая фаза в этой точке будет выглядеть следующим образом:

$$\phi' = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 + \Delta\theta_R - \alpha) \quad (4.30)$$

Разность фаз между двумя точками интерферограммы дана уравнением ниже:

$$\Delta\phi_R = \phi' - \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B [\sin(\theta_0 + \Delta\theta_R - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) \Delta\theta_R \quad (4.31)$$

Разлагая  $\sin \Delta\theta_R$  по малому параметру, получим следующее:  $R\Delta\theta_R \approx R \sin \Delta\theta_R = \Delta R / \operatorname{tg} \theta_0$ . Разность фаз точек интерферограммы как функция расстояния  $\Delta R$  соответствует уравнению

$$\Delta\phi_R = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \sin(\theta_0 - \alpha) \Delta R}{R \cdot \operatorname{tg} \theta_0} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \sin(\theta_0 - \alpha) \Delta R}{R \cdot \operatorname{tg} \theta_0} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\parallel} \Delta R}{R \cdot \operatorname{tg} \theta_0} \quad (4.32)$$

Рассмотрим теперь второй случай, в котором точка  $P'$  располагается на том же самом расстоянии от антенны, что и точка  $P$ , но на высоте  $z + \Delta z$ , где  $\Delta z$  - малое приращение (рисунок 4.13 (b)).

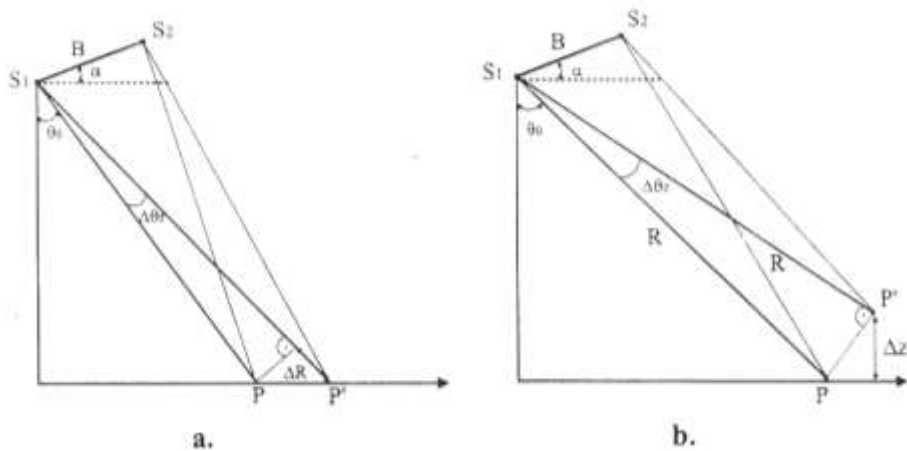


Рисунок 4.13 – Интерпретация интерферометрической фазы

В соответствии с предыдущей ситуацией, вычислим изменение фазы  $\Delta\phi_z$ :

$$\Delta\phi_z = \phi' - \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B[\sin(\theta_0 + \Delta\theta_z - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) \Delta\theta_z \quad (4.33)$$

Используя соотношение  $\Delta\theta_z \approx R \sin \Delta\theta_z = \Delta z / \sin \theta_0$ , получим, что разность интерферометрических фаз, соответствующая вариации по высоте, будет равна:

$$\Delta\phi_z = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \sin(\theta_0 - \alpha) \Delta z}{R \cdot \sin \theta_0} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \Delta z}{R \cdot \sin \theta_0} \quad (4.34)$$

Несложно получить зависимость высоты от интерферометрической разности, поделив  $\Delta\phi_R$  на  $\Delta\phi_z$ :

$$\frac{\Delta\phi_R}{\Delta z} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin \theta_0} \quad (4.35)$$

Уравнение выше можно переписать в виде

$$\Delta z_{2\pi} = -\frac{\lambda}{2} \frac{R \sin \theta_0}{B_{\perp}} \quad (4.36)$$

где  $\Delta z_{2\pi}$  - высота, соответствующая «неразвернутой» интерферограмме. Очевидно, что точность определения высоты прямо пропорциональна длине используемой волны, и использование более коротких длин волн (X- или С - диапазоны) позволит получить более подробную цифровую модель рельефа. С другой стороны, в многопроходной (repeat-pass) интерферометрии короткие длины волн более подвержены «временной» декорреляции, чем более длинные (L- или P - диапазоны).

Увеличение расстояния между сенсорами влечет за собой увеличение разрешения ЦМР, но, с другой стороны, может вызвать декорреляцию из-за квадратичного члена в уравнении (4.25). Хорошие результаты по построению ЦМР получаются при перпендикулярных составляющих расстояния между спутниками метров для С-диапазона, 1500-2000 метров для L-диапазона, однако, в зависимости от рельефа, границы могут быть расширены. В X- диапазоне оптимальные значения лежат в интервале от 50 до 200 метров. Пример цифровой модели местности приведен на рисунке 4.14.

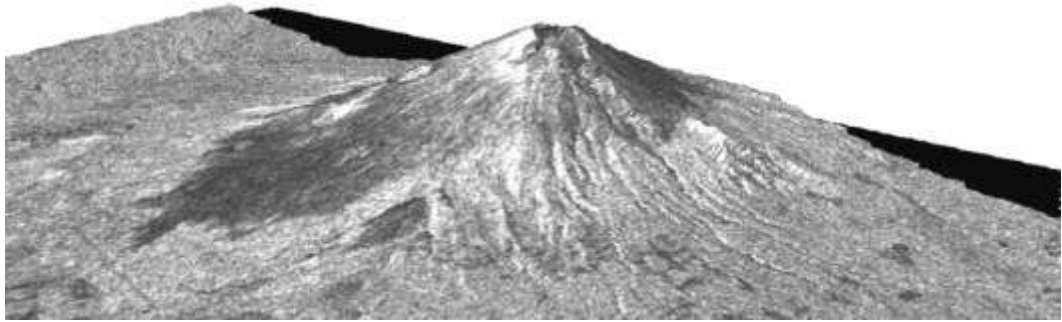


Рисунок 4.14 – Цифровая модель вулкана Фудзиям по данным спутников ERS-1/2,  
(с) ЕКА, 1998

В предыдущем разделе радиолокационная интерферометрия была рассмотрена как техника для получения цифровых моделей рельефа высокого разрешения. Однако ее приложения позволяют обнаруживать динамические деформации с точностью до 1 миллиметра.

Для того, чтобы доказать данный факт, рассмотрим два снимка на территорию, подвергшуюся деформациям. Первый из снимков сделан до, второй – после изменения рельефа. На первом снимке принятый сигнал от точки  $P$  (рисунок 4.15) имеет вид:

$$s_1(R_1) = |s_1(R_1)| \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} R_1\right) \quad (4.37)$$

Второе изображение несет на себе отпечаток деформаций в той же точке  $P$ :

$$s_2(R_2) = |s_2(R_2)| \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} (R_2 + \Delta R_d)\right) \quad (4.38)$$

Фаза точки интерферограммы, сформированной путем комплексного перемножения сигналов  $s_1(R_1)$  и  $s_2(R_2)$ , содержит информацию о произошедшем смещении в направлении линии наблюдения точки со спутника  $\Delta R_d$ :

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_d = \frac{4\pi}{\lambda} B_1 \sin(\theta_1 - \alpha_1) + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_d \quad (4.39)$$

Для оценки величины смещения с помощью этого уравнения нам необходимо удалить первый член. Для этого существует три возможности: первая, наиболее простая, состоит в том, чтобы сократить расстояние между принимающими антеннами до нуля. В этом случае информация о топографии поверхности будет утеряна, и вариации фазы на интерферограмме будут соответствовать только лишь произошедшей деформации. Следовательно, наклонная компонента смещения может быть выявлена прямо из уравнения выше. К сожалению, современное развитие спутниковых систем позволяет получать нулевое значение  $B_1$  лишь по случайности.

Второй путь состоит в возможности использования существующей цифровой модели рельефа для создания симулированной интерферограммы, а затем сравнить ее с существующей. Ограничения в использовании этого метода состоят в необходимости контролировать разрешение используемой ЦМР – низкое разрешение снизит точность в определении  $\Delta R_d$ .

В дальнейшем мы будем рассматривать третью возможность, используя при этом третий радиолокационный снимок той же самой территории, сформированный до процесса деформации (рисунки 4.15 и 4.16). Так, принятый сигнал от точки  $P$ :

$$s_3(R_3) = |s_3(R_3)| \exp\left(\frac{4\pi}{\lambda} R_3\right) \quad (4.40)$$

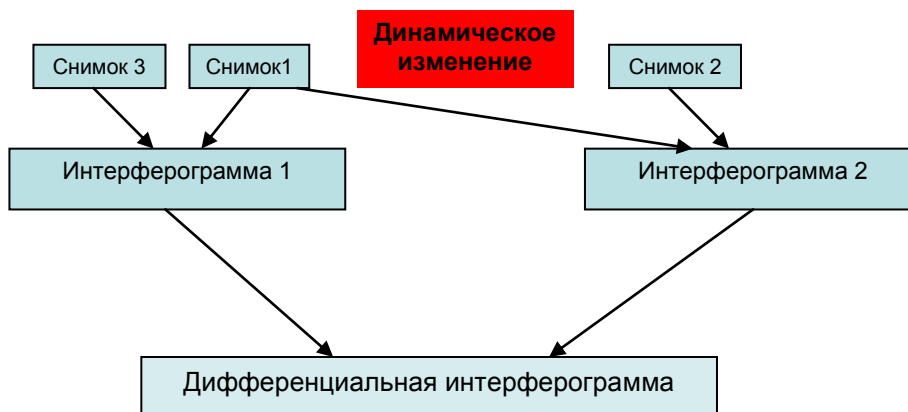


Рисунок 4.15 – Трехпроходная дифференциальная интерферометрия



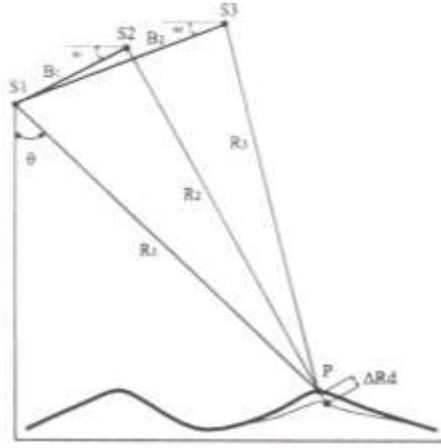


Рисунок 4.16 – Геометрия дифференциальной интерферометрии

Фаза интерферограммы, сформированной первым и третьим снимками, равна:

$$\phi_2 \approx \frac{4\pi}{\lambda} B_{2\parallel} = \frac{4\pi}{\lambda} B_2 \sin(\theta_2 - \alpha_2) \quad (4.41)$$

Теперь будем анализировать первую интерферограмму. Пусть смещение  $\phi_1$  - фаза без смещения, тогда справедливо соотношение:

$$\frac{B_{2\parallel}}{B_{1\parallel}} \phi_1 \approx \frac{4\pi}{\lambda} B_{2\parallel} \quad (4.42)$$

Далее, в результате сравнения имеющихся интерферограмм, получаем набег фазы, соответствующей смещению:

$$\phi_d = \phi_2 - \frac{B_{2\parallel}}{B_{1\parallel}} \phi_1 = \phi_2 - \frac{B_2 \sin(\theta_1 - \alpha)}{B_1 \sin(\theta_2 - \alpha)} \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_d \quad (4.43)$$

Отношение  $\frac{B_{2\parallel}}{B_{1\parallel}}$  зависит от угла наблюдения  $\theta$ , который включает в себя угол  $\theta_0$  и локальный наклон  $\Delta\theta_z$ , который, в свою очередь, зависит от топографии местности. Зависимость от топографии может быть устранена с использованием модели «плоской Земли»:

$$\begin{aligned} \phi_{f_1} &= \frac{4\pi}{\lambda} B_1 [\sin(\theta_{0_1} + \Delta\theta_z - \alpha_1) - \sin(\theta_{0_1} - \alpha_1)] + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_d \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_{0_1} - \alpha_1) \Delta\theta_z + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_d \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\phi_{f_2} = \frac{4\pi}{\lambda} B_2 [\sin(\theta_{0_2} + \Delta\theta_z - \alpha_2) - \sin(\theta_{0_2} - \alpha_2)] = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_{0_2} - \alpha_2) \Delta\theta_{z_2} \quad (4.45)$$

где мы приняли, что  $\Delta\theta_{z_1} \approx \Delta\theta_{z_2}$ .

И теперь мы можем получить выражение для фазы смещения без территориальной зависимости:

$$\phi_d = \phi_{f_1} - \frac{B_{2\parallel}}{B_{1\parallel}} \phi_{f_1} = \phi_{f_1} - \frac{B \sin(\theta_{0_1} - \alpha)}{B \sin(\theta_{0_2} - \alpha)} \phi_{f_2} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_d \quad (4.46)$$

Это уравнение показывает, насколько чувствительна описываемая методика к определению смещений.

Так, например, сенсор, работающий в диапазоне L с фазовым разрешением  $3^\circ$ , теоретически может измерять смещения порядка 1 миллиметра.

Метод 2-х проходной дифференциальной интерферометрии (рисунок 4.17) заключается в использовании существующей цифровой модели рельефа на область интереса и двух снимков (интерферометрической пары), деформации поверхности выявляются между этими двумя съемками.

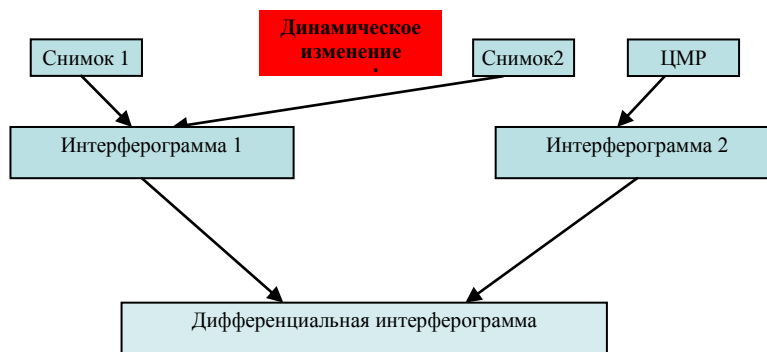


Рисунок 4.17 – Двухпроходная дифференциальная интерферометрия

Как и в случае 3-х проходной дифференциальной интерферометрии, берется разность фазовых составляющих между двумя интерферограммами: первая из них получена из опорной цифровой модели рельефа, вторая путем комплексного перемножения имеющейся пары снимков. Так как снимок 2 был сформирован после вероятных деформаций поверхности, то последняя интерферограмма будет содержать о них информацию. Важно отметить, что в условиях меняющегося кли-

мата, а также нестабильных, меняющихся геофизических характеристиках снимаемых объектов, целесообразно проводить мониторинг с использованием именно этого метода.

Принципиальная схема 4-х проходной дифференциальной интерферометрии представлена на рисунке 4.18.

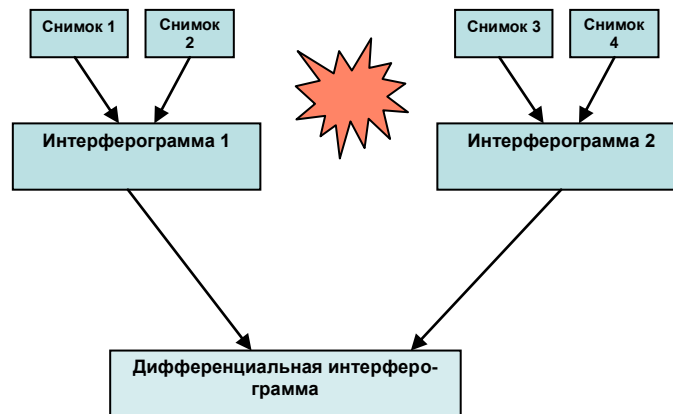


Рисунок 4.18 – Четырехпроходная дифференциальная интерферометрия

Радиолокационная интерферометрия позволяет строить цифровые модели рельефа с точностью порядка десятка сантиметров, и определять смещения на порядок меньше.

Важное требование к применению этого метода – достаточно высокий уровень когерентности между снимками и как можно меньший временной разрыв между снимками.

Хорошие результаты также достигаются благодаря использованию так называемых уголковых отражателей - устройства в виде трёхгранного угла со взаимно перпендикулярными отражающими плоскостями из хорошо отражающего металла (рисунок 4.19).

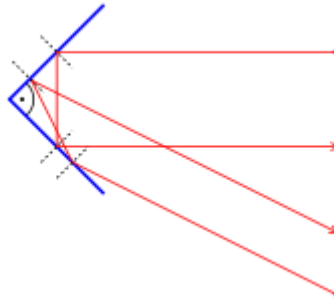


Рисунок 4.19 – Угловой отражатель

Излучение, попавшее в угловой отражатель, отражается в строго обратном направлении.

Радиолокационная интерферометрия с постоянными отражателями (Permanent Scatters Interferometry, PSInSAR) помогает обойти многие факторы, вызывающие декорреляцию при дифференциально-интерферометрической обработке данных, позволяя точно определять скорость движения отдельных, хорошо детектируемых на радарных снимках, элементов рельефа/местности – постоянных отражателях.

Суть этого метода сводится к обработке серии снимков одного и того же участка местности со стационарно отражающими объектами, сохраняющими свои физические и геометрические свойства вне зависимости от температуры, уровня влажности или метеоусловий (примером могут служить здания) по дифференциально-интерферометрической технологии. Более высокая точность по сравнению с классическим методом дифференциальной интерферометрии достигается благодаря использованию большого массива данных. Так, например, имея  $N$  снимков (интерферометрическую цепочку), можно построить  $N-1$  интерферометрических пар с одним и тем же временным разрывом, далее математически исключить влияние атмосферы, геометрическую и временную декорреляции, получив усредненное значение  $\langle \Delta\phi \rangle_{N-1}$  и построить на выходе детальную карту смещений.

Проведенные оценки метода показали [135], что точность интерферометрического метода с постоянными отражателями (зависящая от числа используемых снимков) может достигать долей миллиметра.

Необходимо отметить, что для реализации технологии интерферометрии с постоянными отражателями необходимо иметь выборку, состоящую как минимум из 15-20 снимков. При этом требования к интерферометрическим съемкам (ограничение по величине базовой линии, метеоусловиям и т.д.) могут быть снижены. Обыкновенно этот метод не подходит для оперативного мониторинга деформаций техногенного и природного характера. С помощью данного метода представляется возможным составлять точные прогнозы развития опасных природных/техногенных процессов на среднесрочную и долгосрочную перспективы по причине того, что получение необходимых входных спутниковых интерферометрических данных (15-20 снимков) занимает достаточно длительное время, от нескольких месяцев (в зависимости от периода повтора орбиты спутника).

Известно, что радарные системы спутникового базирования способны получать данные с различными поляризационными состояниями излученного и принятого электромагнитного сигнала. Использование в интерферометрических приложениях (как для построения ЦМР/ЦММ, так и для определения деформаций) данных, представляющих собой набор слоев с различными поляризациями, позволяет проводить оптимизацию фазы волн и улучшать результат по сравнению с интерферометрией в одной поляризации.

Однако, как показывает практика, улучшение результата в процессе оптимизации фазы незначительно, и зачастую съемка в режиме различных поляризаций ведет к снижению пространственного разрешения результирующего изображения. Для данных среднего разрешения, что, в свою очередь, сказывается на загрузлении выходного результата. Проведенные исследования с использованием поляриметрических снимков ENVISAT на территории Якутии и Монголии показали, что оптимизация когерентности составила не более 4% от усредненной когерентности по сцене при обработке стандартными интерферометрическими методами.

Два и более снимка РСА по одному и тому же участку поверхности, полученные в разное время и с параллельных орбит, могут быть использованы для формирования интерферограмм для дальнейшего построения ЦММ/ЦМР или со-

здания карт смещений поверхности. Для такого рода применений фаза радиолокационного снимка является ключевым элементом и нуждается в особо тщательном контроле в процессе формирования изображения.

Безусловно, точное знание параметров положения спутника в моменты съемок, а также наличие информации о его движении во многом определяет качество выходного продукта интерферометрической обработки [154].

Одним из наиболее существенных ошибок является неверное определение базовой линии. Практически, значение базовой линии при обработке интерферометрических пар может быть определено следующими способами:

- по частоте интерферометрических полос (периодов изменения фазы  $[0; 2\pi]$ ), когда частота интерферометрических полос рассчитывается по локальной области интерферограммы, в которой, как предполагается, поверхность имеет наклон, наиболее близкий к опорной поверхности (эллипсоиду, сфере или плоскости); область выбирается оператором на основе дополнительной информации или интуитивно, так что неконтролируемые ошибки неизбежны;

- по расчётным орбитам: базовая линия вычисляется для каждой точки на вспомогательной орбите на основе критериев наименьшего расстояния или нулевой тангенциальной компоненты;

- по опорным точкам и развёрнутой фазе: для уточнения модели базы и параметров расчёта фазовых коэффициентов может быть использован итерационный нелинейный процесс подгонки модели под опорные точки по методу наименьших квадратов, точность метода зависит от величин ошибок измерения и развёртки фазы и от точности самих опорных точек;

- по взаимному смещению снимков при их совмещении (корегистрации): взаимное смещение снимков интерферометрической пары при их корегистрации (определяемое с точностью до долей пикселя) позволяет выполнить триангуляцию наклонных дальностей к точке на поверхности опорного эллипсоида в пределах обрабатываемой сцены; нужно отметить, что точность такой триангуляции весьма невысока, но если нет точной информации о базовой линии, то и такой метод становится приемлемым;

- из моделирования сцены: на основе вспомогательной грубой цифровой модели местности и орбитальных данных платформы рассчитываются базовые линии для всех точек сцены на грубой сетке. Затем различными методами (например, наименьших квадратов) выделяются характеристики поведения базовой линии по направлениям дальности и азимута; точность моделирования зависит, главным образом, от точности грубой ЦМР и ошибок орбитальных данных.

В целом же, ошибки интерферометрической системы, такие, как ошибки определения наклонной дальности и положения радиолокационной системы, не устраняются оператором.

К ошибкам радиолокационного канала относятся:

- ошибка фазовой декорреляции поверхности за время, прошедшее между съёмками;
- ошибка, вносимая средой распространения электромагнитных волн (ЭМВ);
- ошибки, возникающие при прохождении приёмного тракта системы;
- ошибки и абберации фазы в системе обработки.

Все эти ошибки влияют на измеренную разностную фазу на интерферограмме.

Основной источник (хотя и не единственный) фазовых ошибок отражения сигнала от поверхности в двухпроходной интерферометрической системе – это временная декорреляция фазы, т.е. изменение фазы переотражения сигнала элементами поверхности за время, прошедшее между съёмками. Изменение фазы переотражения может быть обусловлено следующими причинами:

- изменением пространственных характеристик (шероховатости) поверхности (обработка почвы, рост растительности);
- изменением диэлектрических свойств поверхности, главным образом связанным с изменением влажности;
- смещение поверхности (оползни, землетрясения).

На практике, временная декорреляция связана чаще всего с первыми двумя причинами. Степень временной декорреляции может сильно варьироваться по об-

рабатываемой сцене, от полного её отсутствия до абсолютной декорреляции, делающей невозможными какие-либо измерения.

Специальные исследования показали, что на интерферограммах в виде искажений разностной фазы могут проявляться эффекты, обусловленные временными и пространственными вариациями водных паров в атмосфере. В то же время, другие параметры тропосферы, такие как давление и температура, также могут оказывать воздействие на разностно-фазовую картину, но эти эффекты гораздо меньше по амплитуде и более «размазаны» по сцене, нежели влияние влажности тропосферы.

Пространственные и временные вариации относительной влажности в 20% приводят к ошибкам при построении ЦМР до 100 м в случае неудачно ориентированной базовой линии и к ошибкам до 10 см при измерении деформаций методом трёхпроходной интерферометрии. В регионах Земли с большой влажностью атмосферные ошибки могут стать доминантными на интерферометрических продуктах.

Ошибки по высоте и деформации во влажных регионах могут быть снижены соответственно до 10 м и 1 см, если пользоваться следующими рекомендациями:

- предпочтительней использовать интерферометрические данные с большей длиной волны (например, L-диапазона, нежели C или X);
- при топографических измерениях использовать максимальную интерферометрическую базу до предела, с которого начинается декорреляция;
- при измерений поверхностных деформаций использовать технологию многократного наблюдения, усредняя полученные продукты.

Несмотря на имеющиеся рекомендации по снижению ошибок, вносимых вариацией атмосферных параметров, их появление трудно спрогнозировать, а для количественной оценки требуется знание характеристик атмосферы на линии распространения ЭМВ, что на практике редко осуществимо.

На настоящий момент наиболее детальная оценка влияния атмосферы на интерферограммы сделана R. Hanssen [5]. Он проанализировал влияние атмо-



сферных неоднородностей на разностную фазу на примере серии из 26 интерферометрических пар тандема ERS-1/2 и сопоставил их с соответствующими метеоданными. Главный упор сделан был на количественный анализ проявившихся на интерферограммах атмосферных артефактов на амплитудной шкале, на классификацию эффектов и сравнении с метеоданными для выявления закономерностей, связывающих артефакты с атмосферными процессами.

Атмосферные эффекты были обнаружены на всех 26 интерферограммах. Пространственный масштаб областей зашумления составил от сотен метров до 100-200 км. Значение среднеквадратического отклонения атмосферных ошибок составило 0.5-4 радиан. Экстремальные значения фазовой ошибки в 4 цикла были обнаружены на двух парах, полученных во время бури на поверхности. Атмосферные эффекты были классифицированы на 5 категорий:

- изолированные аномалии, т.е. аномалии с пространственным перекрытием 20 км или менее и фазовыми отклонениями 2 радиана и более, обнаруженные на 18 интерферограммах;

- полосовые аномалии, т.е. линейные структуры значительного размера на разностно-фазовых картинках, часто связанные с переносом влаги в атмосфере, обнаруженные на 10 интерферограммах;

- волновые эффекты, такие как гравитационное поле, потоки влажного воздуха или облачности, которые часто были видны лишь на части интерферограмм;

- фронтальные зоны с явно различными свойствами, от сглаженных фазовых градиентов до очень отчётливых волновых пиков с периодом почти в 5 километров;

- наконец, общие атмосферные вариации, характеризующиеся ограниченной амплитудой фазовых колебаний и меняющимся периодом колебаний, связанные, главным образом, с турбулентностью воздушной массы и её составляющих. Как было выявлено в процессе исследований, в качестве ведущих механизмов, определяющих изменение индекса рефракции атмосферы, выступают не только распределение давления, температуры и водных паров, но также ливневые дожди и холодные фронты. По большей части, пространственные вариации давления и

температуры, самих по себе, не достаточно большие, чтобы вызвать сильные локализованные градиенты по всей сцене, однако достаточны, чтобы привести к глобальным градиентам с периодом, сопоставимым с размером сцены, которые похожи на ошибки определения орбиты. Доминантным механизмом являются пространственные и временные вариации влажности.

Меняющаяся плотность электронов в ионосфере приводит к изменению задержки сигнала, т.е. к вариациям наклонной дальности. Этот эффект проявляется в областях, где общее содержание электронов существенно отличается от соседних областей.

Влияние содержания электронов на распространение ЭМВ зависит от частоты сигнала. Для РСА С-диапазона было отмечено смещение 2.8 см.

Пространственная область на интерферограмме, занимаемая ионосферными пертурбациями, обычно более 30 км. Из-за большого пространственного распространения, как предполагается, ионосферные эффекты распространены практически по всем сценам РСА ERS-1/2.

К ошибкам, вносимым аппаратурой РСА, относятся:

- ошибки неодинакового сдвига фазы в квадратурных каналах приёмника;
- ошибки, вносимые разным коэффициентом усиления квадратурных каналов;
- ошибки, вносимые аналого-цифровым преобразователем;
- тепловой шум приёмника.

Первая и вторая составляющие компенсируются в процессе формирования изображения, вторая достаточно мала. Характеристики теплового шума приёмника могут быть экспериментально оценены по областям затенения на РЛ снимках [241], если съёмка производится по областям с хорошо выраженным рельефом или по участкам слабоотражающей поверхности (спокойная вода, бетон, асфальт).

К искажениям интерферограммы, вносимым при формировании изображений пары и их совмещения относятся [6, 241]:

- постоянная фазовая ошибка;
- геометрический сдвиг между снимками по азимуту;

- геометрический сдвиг по дальности;
- расфокусировка по азимуту, обусловленная неправильной скоростью изменения фазы опорной функции;
- расфокусировка по дальности, обусловленная неправильной скоростью изменения фазы в ЛЧМ сигнале или неправильным коэффициентом вторичной фокусировки по дальности;
- некомпенсированная линейная миграция по дальности;
- некомпенсированная квадратичная миграция по дальности;
- ошибки интерполяции.

Перечисленные выше ошибки формирования снимков являются, главным образом, следствием неточного знания положения платформы РСА на время съёмки и неправильной оценки доплеровской частоты по радиоголограмме. Первая ошибка может быть оценена априорно, в то же время, вторая непрогнозируема, особенно с учетом потенциально возможной неоднозначности спектральных оценок. Ошибки неправильного совмещения также трудно заранее спрогнозировать, их уровень зависит как от алгоритма совмещения, так и от содержания обрабатываемой сцены [30]. Своё влияние также могут оказать и ошибки оператора, если совмещение производится вручную.

Ниже приведена обобщенная схема источников ошибок интерферометрическими методами (рисунок 4.20).

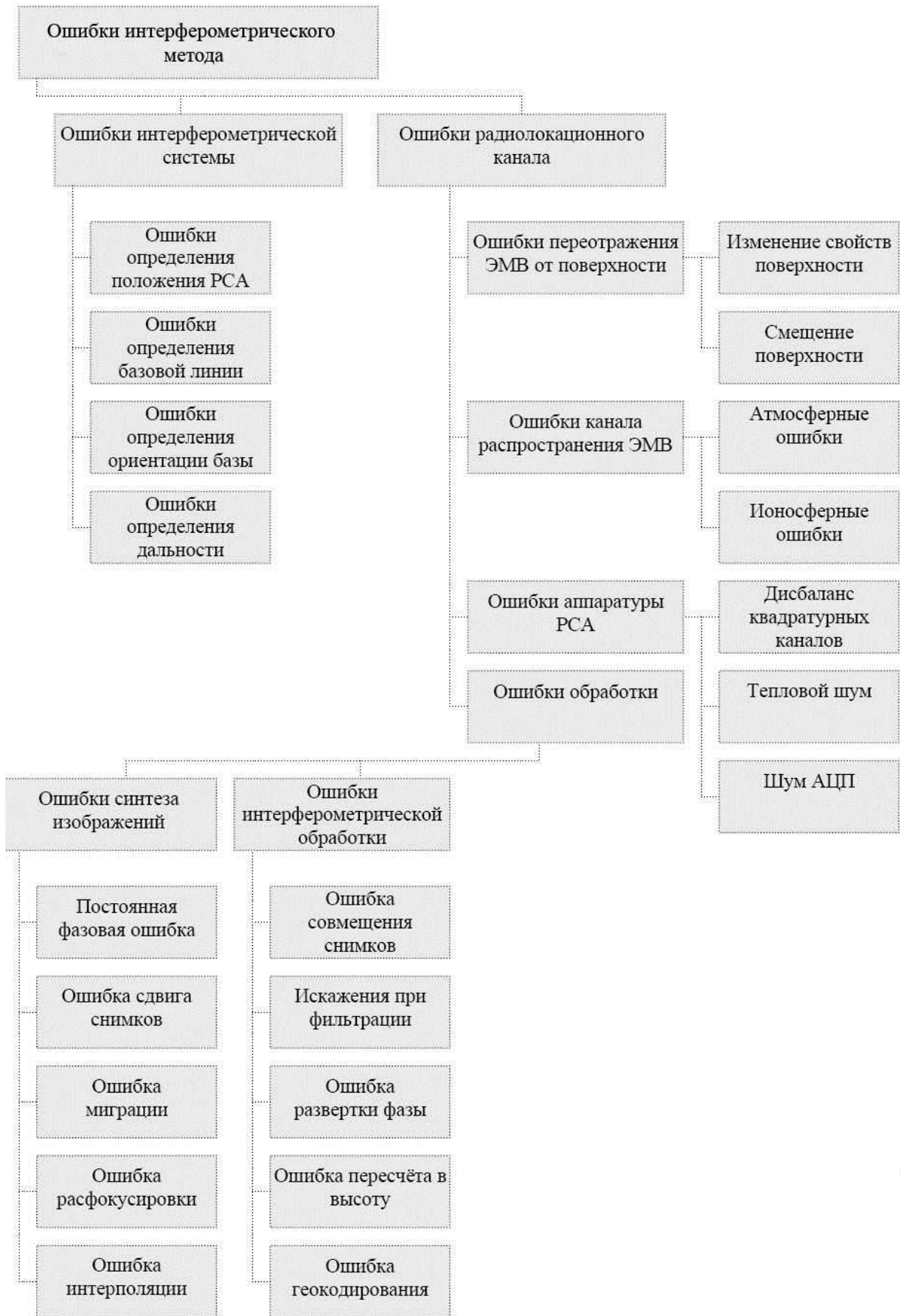


Рисунок 4.20 – Обобщенная схема источников ошибок в интерферометрической обработке данных

## **4.2 Методика построения цифровой модели местности территории пролегания потенциально-опасных участков железнодорожного пути на примере линии Адлер-Туапсе**

Для апробации разрабатываемой технологии по опытному участку Туапсе-Адлер с помощью системы Eoli-SA Европейского космического агентства (<http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=5035>) были отобраны и заказаны снимки среднего разрешения со спутников ERS-1, ERS-2, ENVISAT за 10-15 лет [8,9,10].

Система Eoli-SA позволяет производить отбор снимков ERS-1/2, ENVISAT как в обычном «одиночном» режиме, так и для интерферометрической обработки, показывая при этом необходимые параметры, как-то: величину базовой линии между положениями спутника в моменты съемок, угол наблюдения.

Можно проводить отбор снимков без опции «Interferometry». В этом случае для интерферометрической обработки подходят снимки одного сенсора с одинаковыми значениями колонок Track (соответствует участку съемки), Swath (соответствует углу наблюдения), Pass (тип орбиты: восходящая или нисходящая), а также Start (начало съемки) для выбранной территории интереса. Необходимое очевидное требование – наличие перекрытия между снимками.

Для участка «Туапсе-Сочи» была построена карта склонов для изучаемой местности с использованием ЦМР SRTM с размером ячейки 90 метров (рисунок 4.21 и 4.22). Это было сделано для того, чтобы исключить возможное заслонение объекта исследования – побережье Черного моря «Туапсе-Адлер». Проведенный анализ участка «Туапсе-Сочи» показал, что вдоль побережья (ширина полосы до 10 километров) высоты не превышают 500 метров. Аналогичный результат можно получить на участке побережья «Сочи-Адлер». Тем не менее, целесообразно выбирать высокие углы наблюдения из-за возможного наличия растительности или элементов лесного покрова вдоль наблюдаемых элементов железнодорожной инфраструктуры, которые могут дать эффект радарной тени на изображении при съемке, либо другие искажения.

Обобщая, можно сказать, что при съемке высокогорного рельефа имеет смысл вести наблюдение при небольших углах отклонения от надира (8-40 градусов), тогда как при сравнительно гладком рельефе угол наблюдения может варьироваться от 8 до 60 градусов на безлесной местности.

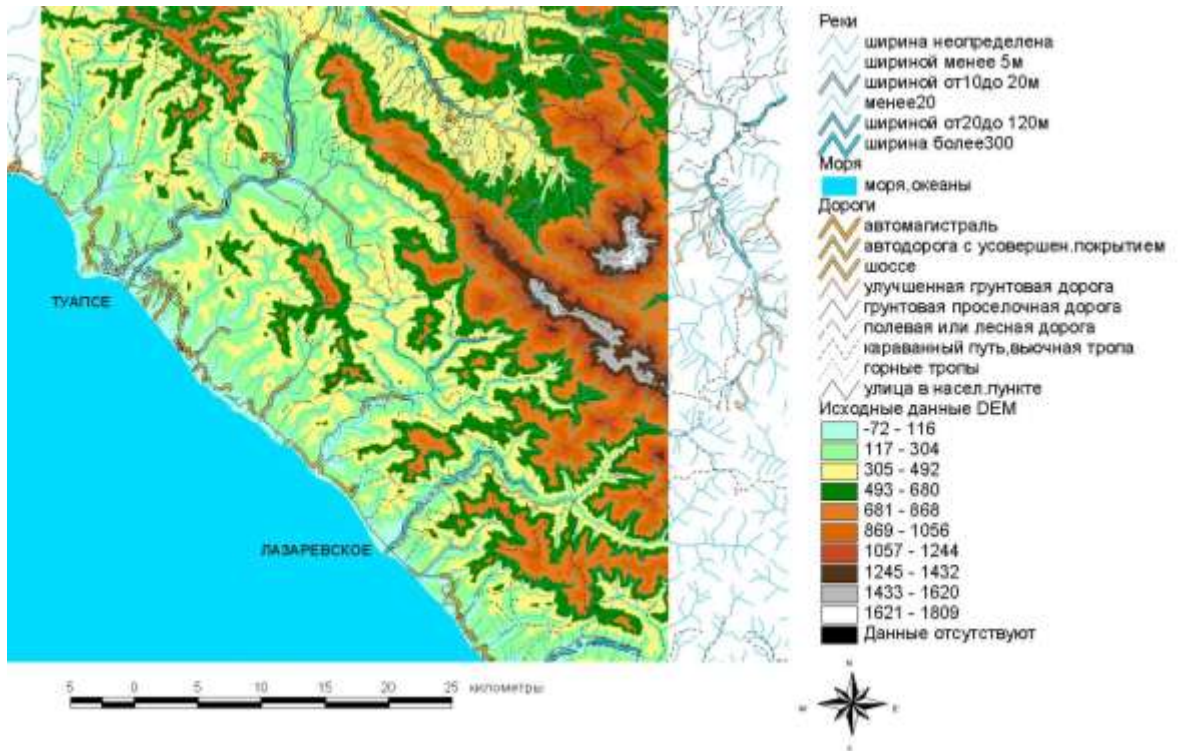


Рисунок 4.21 – Исходные данные ЦМР SRTM

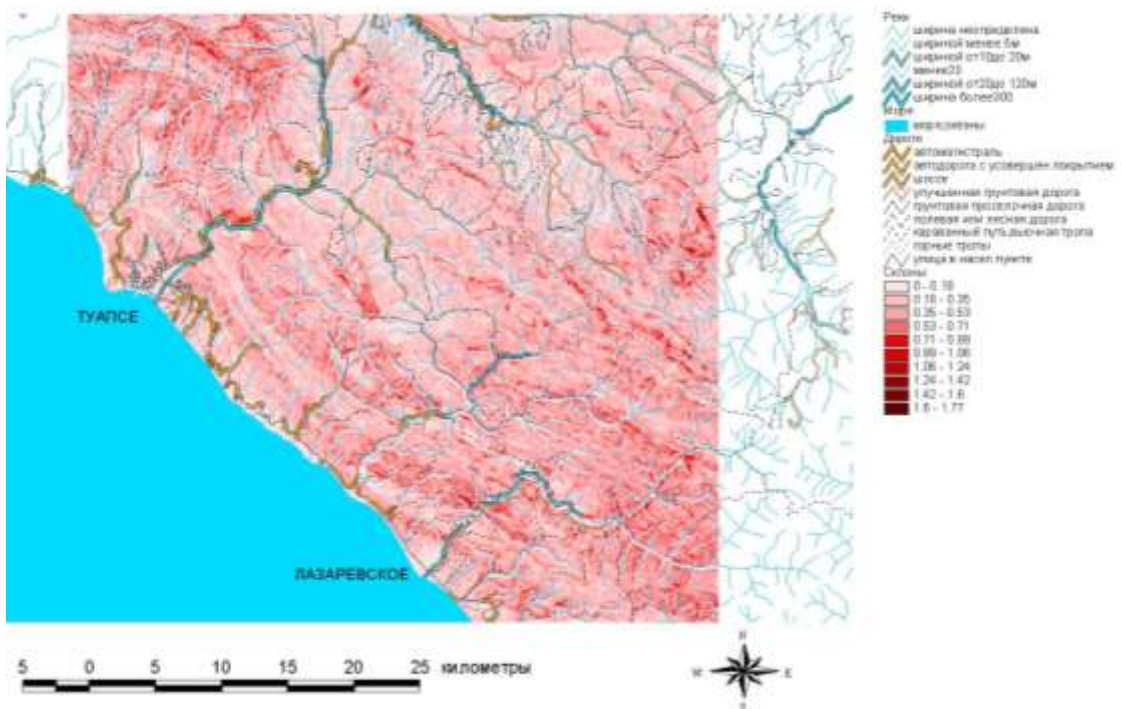


Рисунок 4.22 – Оценка крутизны склонов на участке "Туапсе-Сочи" (в радианах)

Ниже приведен пример отбора тандемных интерферометрических пар ERS-1/ERS-2 на участок Адлер-Туапсе (рисунок 4.23 и 4.24). В верхнем левом углу (*Collections*) необходимо выбрать нужный продукт (в нашем случае – данные спутников ERS сенсора SAR). Далее, ниже, ввести параметры поиска: координаты территории, диапазон дат съемки, ограничения на величину базовой линии, временной разрыв между съемками. Также можно указать угол съемки, тип орбиты – восходящую или нисходящую, и задать опции отображения результатов. Под картой, отображающей область интереса, выводятся результаты поиска.

The screenshot shows the ESA EOUI search interface. The search panel on the left is configured for 'ERS Tandem Interferometry'. The search criteria include:

- Date:** From 21-Mar-1994 to 21-Mar-2005
- Area:** Center Lat/Lon (Adm/UTM): 43.40 20, 40 00 10; Height (M/ft): 01 03, 75 43
- ERS Tandem Interferometry:** Perpendicular Baseline (m): From [ ] To [ ]; Doppler Centroid Difference (Hz): From [ ] To [ ]; Data Offset (days): From [ ] To [ ]
- Local-ERS SAR:** show results as Standard Satimg (checked), show Tables (checked)
- Satellite:** ERS-1, ERS-2 (checked)
- Orbit:** From [ ] To [ ]

The central map displays the search area over the Black Sea coast. The results table at the bottom lists the following data:

Display	Mission	Orbit	Group	Baseline	Sensor	Product	Track	Pass	Swath	Buy INT	Or
✓	ERS-1	1	ERS-1	ERS-1	ERS-1 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-2	2	ERS-2	ERS-2	ERS-2 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-1	1	ERS-1	ERS-1	ERS-1 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-2	2	ERS-2	ERS-2	ERS-2 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-1	1	ERS-1	ERS-1	ERS-1 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-2	2	ERS-2	ERS-2	ERS-2 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-1	1	ERS-1	ERS-1	ERS-1 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-2	2	ERS-2	ERS-2	ERS-2 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-1	1	ERS-1	ERS-1	ERS-1 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-2	2	ERS-2	ERS-2	ERS-2 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-1	1	ERS-1	ERS-1	ERS-1 SAR	SAR	113	1	1	1	181
✓	ERS-2	2	ERS-2	ERS-2	ERS-2 SAR	SAR	113	1	1	1	181

Рисунок 4.23 – Пример поиска данных в каталоге

При двойном клике по описанию снимка (строка таблицы) можно посмотреть уменьшенное изображение в значениях интенсивности (quicklook).

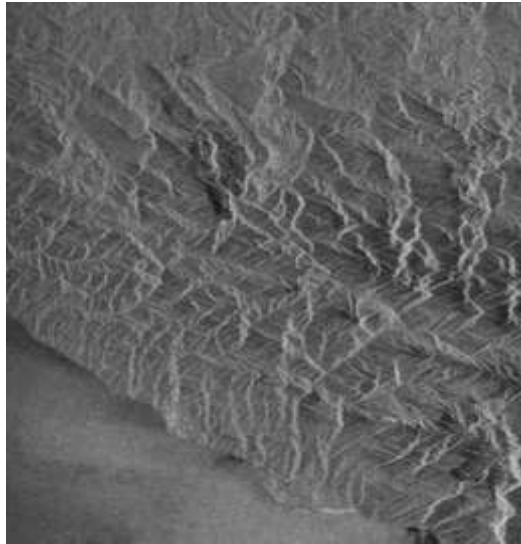


Рисунок 4.26 – Просмотр заказываемого снимка ERS-2

Все снимки ERS-1 были получены под углом падения 22,5 градуса, соответственно, интерферометрические тандемные пары для них спутника ERS-2 (временной интервал – 1 день) также были сделаны под тем же углом наблюдения с различием порядка  $10^{-4}$  радиан для соблюдения требований к величине базовой линии. При отборе на базовую линию накладывалось ограничение: она должна быть не более 300 метров.

Тандемные снимки ERS-1/2 целесообразно в первую очередь рассматривать как материал для построения цифровых моделей рельефа, так как временной интервал в 1 день достаточно мал для определения мельчайших подвижек, произошедших в течение него (методом 2-х и 3-х проходной дифференциальной интерферометрии).

Однако для приложений 4-х проходной дифференциальной интерферометрии тандемные данные ERS-1/2 представляют большой интерес, т.к. в данной схеме мы имеем 2 пары снимков с достаточно высоким уровнем когерентности попарно. Используя тандемные пары ERS-1/2 даже с большим временным разрывом, возможно, получать информацию о смещениях земной поверхности (при допущении, что на распространение электромагнитных волн оказывают влияние факторы одной и той же силы).



Тем не менее, пар ERS-1/2, подходящих для 4-х проходной дифференциальной интерферометрии, сравнительно немного, и тандемная съемка спутниками ERS-1/2 более не ведется.

Отбор тандемных снимков ERS-1/2 особенно актуален в связи с запусками современных спутников (серии спутников) TerraSAR-X и COSMO-SkyMed, позволяющих получать РЛ снимки с пространственным разрешением до 1 метра. Предполагается, что данные серии будут производить тандемные снимки территории интереса заказчика. Следовательно, использование архивных тандемных данных ERS-1/2 оправдано и направлено на разработку теоретических основ обработки тандемных данных сверхвысокого пространственного разрешения.

Ниже приведен список отобранных тандемных снимков ERS-1/2 (таблица 4.9 и таблица 4.10) для интерферометрической обработки (6 снимков, 3 интерферометрические тандемные пары с временным разрывом в 1 день и возможностью осуществить 4-х проходную дифференциальную интерферометрию по одному и тому же треку). Временной интервал, в который вошли удовлетворительные интерферометрические пары – 1995 год (в это время данный район снимался особенно интенсивно).

Таблица 4.9 – Список заказанных снимков ERS-1/2 (тандемные пары)

Номер снимка	Спутник	Трек	Время начала съемки	Время окончания съемки	Орбита
1	ERS-1	357	1995-07-13 19:34:52.82	1995-07-13 19:35:08.82	A
2	ERS-2	357	1995-07-14 19:34:55.85	1995-07-14 19:35:11.84	A
3	ERS-1	307	1995-09-18 08:10:48.66	1995-09-18 08:11:04.65	D
4	ERS-2	307	1995-09-19 08:10:51.93	1995-09-19 08:11:07.93	D
5	ERS-1	307	1995-08-14 08:10:52	1995-08-14 08:11:09	D
6	ERS-2	307	1995-08-15 08:10:55	1995-08-15 08:11:12	D

Таблица 4.10 – Список заказанных снимков ERS-2

<b>Номер снимка</b>	<b>Спутник</b>	<b>Трек</b>	<b>Время начала съемки</b>	<b>Время окончания съемки</b>	<b>Орбита</b>
1	ERS-2	307	1999-04-06 08:10:42.17	1999-04-06 08:10:58.17	D
2	ERS-2	307	1999-05-11 08:10:43.48	1999-05-11 08:10:59.49	D
3	ERS-2	307	1999-06-15 08:10:38.47	1999-06-15 08:10:54.47	D
4	ERS-2	307	1999-09-28 08:10:40.35	1999-09-28 08:10:56.35	D
5	ERS-2	307	2000-04-25 08:10:42.29	2000-04-25 08:10:58.29	D
6	ERS-2	307	2000-05-30 08:10:36.54	2000-05-30 08:10:52.54	D
7	ERS-2	307	2000-10-17 08:10:51.41	2000-10-17 08:11:07.41	D
8	ERS-2	307	2000-11-21 08:10:47.31	2000-11-21 08:11:03.31	D
9	ERS-2	307	2002-07-09 08:09:09.38	2002-07-09 08:09:25.38	D
10	ERS-2	307	2002-08-13 08:09:14.58	2002-08-13 08:09:30.58	D
11	ERS-2	307	2002-12-31 08:09:05.47	2002-12-31 08:09:21.47	D
12	ERS-2	307	2003-04-15 08:09:03.33	2003-04-15 08:09:19.33	D

Продолжение таблицы 4.10

<b>Номер снимка</b>	<b>Спутник</b>	<b>Трек</b>	<b>Время начала съемки</b>	<b>Время окончания съемки</b>	<b>Орбита</b>
13	ERS-2	307	2003-07-29 08:09:16.78	2003-07-29 08:09:32.78	D
14	ERS-2	307	2003-09-02 08:09:18.70	2003-09-02 08:09:34.70	D
15	ERS-2	307	2003-10-07 08:09:16.99	2003-10-07 08:09:32.98	D
16	ERS-2	307	2003-11-11 08:09:10.19	2003-11-11 08:09:26.18	D
17	ERS-2	307	2004-01-20 08:09:14.03	2004-01-20 08:09:30.03	D
18	ERS-2	307	2004-02-24 08:09:13.48	2004-02-24 08:09:29.48	D
19	ERS-2	307	2004-03-30 08:09:07.20	2004-03-30 08:09:23.20	D
20	ERS-2	307	2004-06-08 08:09:17.13	2004-06-08 08:09:33.13	D
21	ERS-2	307	2004-08-17 08:09:26.05	2004-08-17 08:09:42.05	D
22	ERS-2	307	2004-09-21 08:09:22.19	2004-09-21 08:09:38.19	D
23	ERS-2	307	2004-10-26 08:09:16.87	2004-10-26 08:09:32.87	D
24	ERS-2	307	2005-01-04 08:09:22.02	2005-01-04 08:09:38.02	D

Продолжение таблицы 4.10

<b>Номер снимка</b>	<b>Спутник</b>	<b>Трек</b>	<b>Время начала съемки</b>	<b>Время окончания съемки</b>	<b>Орбита</b>
25	ERS-2	307	2005-03-15 08:09:13.77	2005-03-15 08:09:29.77	D
26	ERS-2	307	2005-06-28 08:09:23.80	2005-06-28 08:09:39.80	D
27	ERS-2	307	2005-08-02 08:09:24.05	2005-08-02 08:09:40.05	D
28	ERS-2	307	2006-05-09 08:09:17.30	2006-05-09 08:09:33.30	D
29	ERS-2	307	2006-06-13 08:09:20.07	2006-06-13 08:09:36.07	D
30	ERS-2	307	2006-07-18 08:09:23.25	2006-07-18 08:09:39.25	D
31	ERS-2	307	2006-09-26 08:09:14.63	2006-09-26 08:09:30.63	D
32	ERS-2	307	2006-10-31 08:09:04.52	2006-10-31 08:09:20.52	D
33	ERS-2	307	2003-12-16 08:09:09.94	2003-12-16 08:09:25.94	D
34	ERS-2	307	2007-07-03 08:09:16	2007-07-03 08:09:32	D
35	ERS-2	307	2007-05-29 08:09:16	2007-05-29 08:09:32	D

Временной разрыв между интерферометрическими съемками спутников ENVISAT –  $35N$  дней, где  $N$  – любое натуральное число (1, 2, 3...). Область интересов – участок «Туапсе-Адлер». Временной интервал для заказываемых съемок – 2003-2007 гг. Отобрано 19 снимков ENVISAT, образующих между собой 10 интерферометрических пар (таблица 4.11). Перечисленные снимки составляют 46 интерферометрических пар для апробации разрабатываемой технологии с помощью метода 2-х проходной дифференциальной интерферометрии, также образуют 7 триплетов с временным разрывом между съемками 35 дней для апробации разрабатываемой технологии по методу 3-х проходной интерферометрии, 7 наборов из 4 снимков для апробации разрабатываемой технологии по методу 4-х проходной дифференциальной интерферометрии с временным разрывом между съемками 35 дней.

Выбранные данные характеризуются углами съемок от 20 до 45 градусов по отношению к надиру, что оптимально для исследуемой территории.

Перпендикулярная составляющая базовой линии между снимками с 35-дневным временным разрывом не превышает 500 метров, что снижает риск декорреляции снимков (принимая во внимание сложный рельеф изучаемой территории).

Также по выбранным данным ENVISAT предполагается провести апробацию технологии интерферометрической обработки с постоянными отражателями.

Таблица 4.11 – Список заказанных снимков ENVISAT на участок «Туапсе-Адлер»

<b>Номер снимка</b>	<b>Спутник</b>	<b>Трек</b>	<b>Время начала съемки</b>	<b>Время окончания съемки</b>	<b>Орбита</b>
1	ENVISAT	307	2003-11-11 07:40:47.08	2003-11-11 07:41:03.08	D
2	ENVISAT	307	2004-02-24 07:40:45.71	2004-02-24 07:41:01.71	D
3	ENVISAT	407	2007-11-27 07:20:44.71	2007-11-27 07:20:59.71	D
4	ENVISAT	307	2004-05-04 07:40:46.25	2004-05-04 07:41:02.25	D
5	ENVISAT	35	2004-04-15 07:37:55.26	2004-04-15 07:38:11.26	D
6	ENVISAT	78	2004-04-18 07:43:28.43	2004-04-18 07:43:44.43	D
7	ENVISAT	407	2007-10-23 07:20:49.19	2007-10-23 07:21:05.19	D
8	ENVISAT	35	2004-05-20 07:37:58.92	2004-05-20 07:38:14.92	D
9	ENVISAT	35	2004-10-07 07:37:59.84	2004-10-07 07:38:15.85	D
10	ENVISAT	78	2004-08-01 07:43:38.96	2004-08-01 07:43:54.96	D
11	ENVISAT	35	2004-11-11 07:37:58.26	2004-11-11 07:38:14.26	D
12	ENVISAT	35	2005-03-31 07:37:55.80	2005-03-31 07:38:11.79	D

Продолжение таблицы 4.11

<b>Номер снимка</b>	<b>Спутник</b>	<b>Трек</b>	<b>Время начала съемки</b>	<b>Время окончания съемки</b>	<b>Орбита</b>
13	ENVISAT	35	2004-12-16 07:38:07.29	2004-12-16 07:38:23.29	D
14	ENVISAT	35	2005-02-24 07:38:07.27	2005-02-24 07:38:23.27	D
15	ENVISAT	78	2004-12-19 07:43:37.38	2004-12-19 07:43:53.38	D
16	ENVISAT	78	2005-02-27 07:43:37.75	2005-02-27 07:43:53.75	D
17	ENVISAT	78	2005-06-12 07:43:38.76	2005-06-12 07:43:54.76	D
18	ENVISAT	78	2005-07-17 07:43:40.58	2005-07-17 07:43:56.58	D
19	ENVISAT	78	2005-10-30 07:43:38.11	2005-10-30 07:43:54.11	D

Отбор данных ALOS PALSAR производился в интерактивном каталоге, разработанном японским аэрокосмическим агентством. Каталог доступен по адресу в INTERNET <https://auig.eoc.jaxa.jp/auigs/top/TOP1000Init.do>

Схема покрытия отображенными данными ALOS PALSAR приведена на рисунке 4.25.

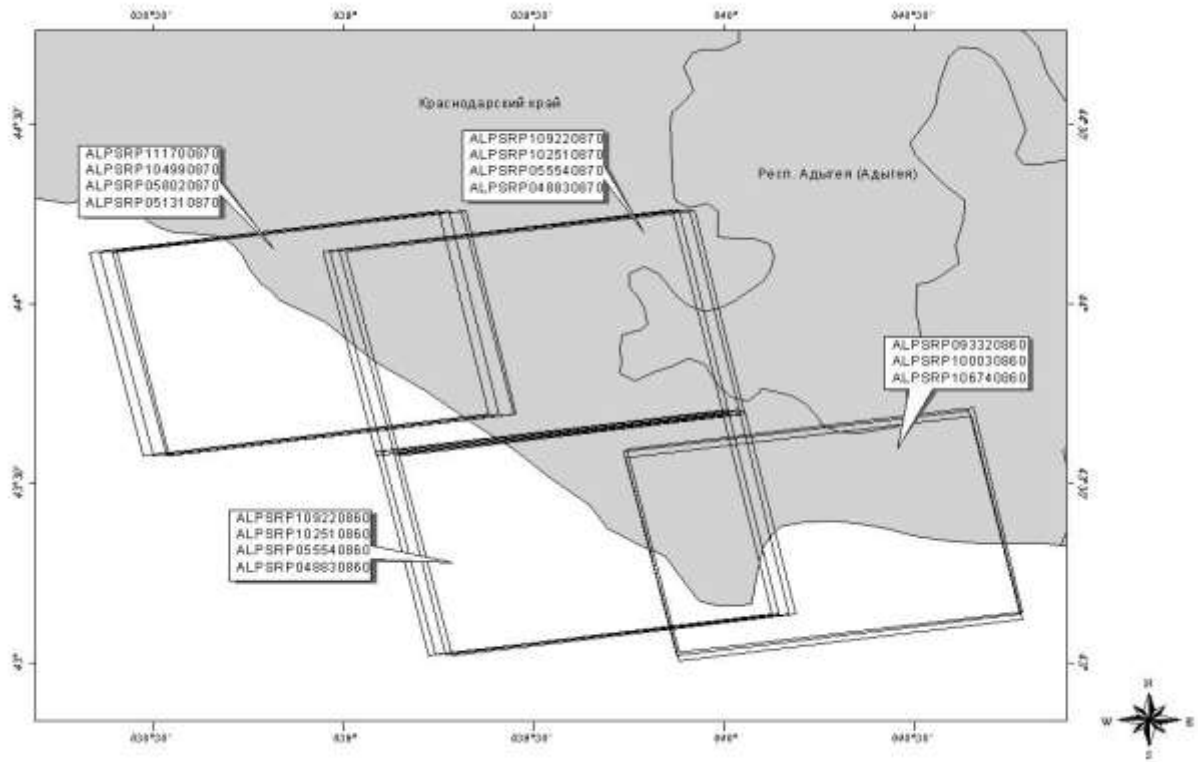


Рисунок 4.25 – Схема покрытия области интереса данными ALOS PALSAR

Даты съемок отобранных файлов:

ALPSRP048830860 (24-12-2006), ALPSRP048830870 (24-12-2006),  
 ALPSRP051310870 (10-01-2007), ALPSRP055540860 (08-02-2007),  
 ALPSRP055540870 (08-02-2007), ALPSRP058020870 (25-02-2007),  
 ALPSRP093320860 (25-10-2007), ALPSRP100030860 (10-12-2007),  
 ALPSRP102510860 (27-12-2007), ALPSRP102510870 (27-12-2007),  
 ALPSRP104990870 (13-01-2008), ALPSRP106740860 (25-01-2008),  
 ALPSRP109220860 (11-02-2008), ALPSRP109220870 (11-02-2008)  
 ALPSRP111700870 (28-02-2008).

Следует отметить, что выбранные снимки на момент заказа являлись единственными существующими интерферометрическими данными для выбранного участка. Преимущественно все съемки относятся к зимнему периоду.

Список отобранных на участок «Туапсе-Адлер» снимков спутника ALOS для интерферометрической обработки представлен в таблице 4.12. Выбранные сцены



являются наиболее приемлемыми для осуществления интерферометрической обработки по различным методикам. Снимки разделены на 4 группы – интерферометрические цепочки.

Таблица 4.12 – Список заказанных снимков ALOS на участок «Туапсе-Адлер»

Номер снимка	Дата съемки	Время съемки (по центру сцены)	Орбита
1	2006/12/24	19:44:23.628	A
2	2007/02/08	19:44:38.483	A
3	2007/12/27	19:43:42.813	A
4	2008/02/11	19:43:10.083	A
5	2006/12/24	19:44:31.842	A
6	2007/02/08	19:44:46.697	A
7	2007/12/27	19:43:51.026	A
8	2008/02/11	19:43:18.296	A
9	2007/01/10	19:46:50.389	A
10	2007/02/25	19:46:59.514	A
11	2008/01/13	19:45:48.018	A
12	2008/02/28	19:45:13.152	A
13	2007/10/25	19:41:14.164	A
14	2007/12/10	19:41:42.329	A
15	2008/01/25	19:41:14.164	A

Предполагается, что обработка данных спутника ALOS (сенсор PALSAR) позволит получить существенно более достоверные цифровые модели рельефа/местности, как по покрытию территории, так и по точности по высоте.

Снимки интерферометрической пары, полученные на разных витках, будут смещены и повернуты друг относительно друга. Совмещение радиолокационных изображений с точностью лучше размера элемента изображения необходимо для

точного подсчёта интерферограммы [45]. Чем точнее совмещены изображения, тем выше будет отношение сигнал/шум и тем меньше будет фазовых ошибок на интерферограмме.

Главная цель совмещения изображений – пересчёт раstra вспомогательного изображения в геометрию основного изображения с помощью аффинного преобразования. При этом предполагается, что траектории платформ спутников с радиолокатором на борту на интервале съёмок практически параллельны и аффинного преобразования достаточно для пересчёта раstra вспомогательного изображения [44].

Аффинное преобразование является комбинацией линейных преобразований, сопровождаемых переносом изображений. Любое аффинное преобразование плоскости можно описать при помощи троек однородных координат и матриц третьего порядка. Транспонированный последний столбец обобщенной матрицы 3x3 аффинного преобразования равен 001 .

Матрицу линейного преобразования общего вида для двумерных однородных координат можно записать следующим образом:

$$T = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \beta_1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \beta_2 \\ \chi_1 & \chi_2 & \delta_1 \end{vmatrix} \quad (4.47)$$

Эта матрица содержит в себе четыре подматрицы, составленные по принципу разнородности их влияния на результат линейного преобразования [241].

1. Элементы подматрицы размерностью 2x2  $\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix}$  отвечают за операции сдвига, вращения и масштабирования.
2. Элементы подматрицы размерностью 1x2  $\begin{vmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{vmatrix}$  необходимы для переноса (смещения) снимка.
3. Элементы подматрицы размерностью 2x1  $\begin{vmatrix} \chi_1 & \chi_2 \end{vmatrix}$  используются для задания проекций.

4. Элемент подматрицы размерностью  $1 \times 1$   $\delta_1$  отвечает за однородное изменение масштаба снимка.

Перечисленные выше преобразования являются элементарными. Более сложные преобразования выполняются с использованием цепочки последовательно выполняемых элементарных преобразований. В нашем случае аффинное преобразование может быть описано следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} x' &= \alpha_{11}x + \alpha_{12}y + \beta_1 \\ y' &= \alpha_{21}x + \alpha_{22}y + \beta_2 \end{aligned} \quad (4.48)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты точки на исходном вспомогательном снимке, а  $x'$  и  $y'$  – координаты на совмещённом вспомогательном снимке.

Чем больше найдено надёжных идентичных точек, тем более точно могут быть подсчитаны параметры  $\{\alpha_{ij} \ \beta_{ij}\}$  аффинного преобразования.

Необходимы минимум три точки для определения шести параметров аффинного преобразования [45]. Идентифицированные на изображениях точки должны быть распределены равномерно по полю снимка (регулярная сетка).

Субпиксельный уровень автоматического поиска идентичных точек достигается интерполяцией с ядром  $\sin(x)/x$

Выделение фрагмента снимка, который будет использоваться для дальнейшей обработки, может быть интерактивно сделано пользователем на амплитудном изображении (рисунок 4.26). Эта функция опциональна, т.е. в процессе обработки может не участвовать.



Рисунок 4.26 – Фрагмент снимка ALOS PALSAR

Интерферограмма является результатом комплексного перемножения основного изображения и изображения, комплексно-сопряженного к вспомогательному.

В результате перемножения формируется разностно-фазовая картина поверхности (рисунок 4.27).

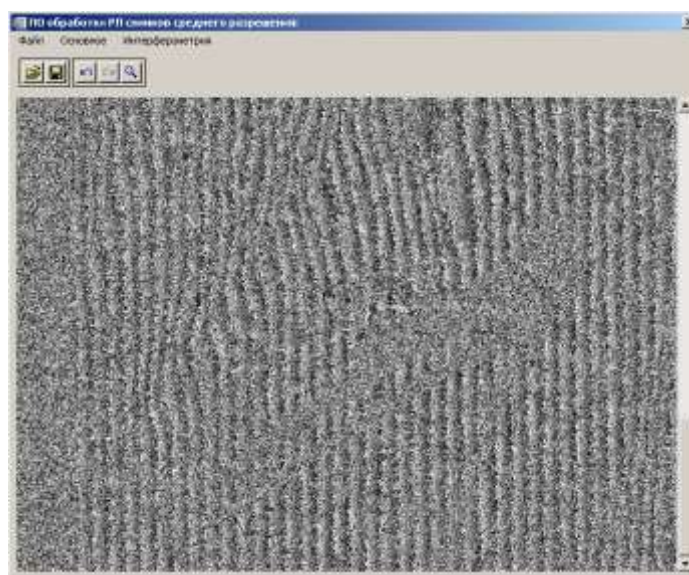


Рисунок 4.27 – Интерферограмма, полученная в прототипе ПО обработки РЛ снимков среднего разрешения

Выполняется компенсация фазовых набегов интерферограммы по линии наземной дальности и по азимуту. Необходимость компенсации фазового набега по линии наземной дальности обусловлена наличием в разностно-фазовом изображении информации, как о высоте объекта наблюдения, так и о расстоянии до него. Компенсация фазового набега по азимуту устраняет из фазовой картины составляющую, обусловленную непараллельностью орбит при получении основного и вспомогательного изображений.

Существует несколько видов компенсаций интерферограмм, в основе которых лежит анализ:

- только интерферограммы как изображения;
- базовой линии (параметров полета спутника);
- внешней цифровой модели рельефа.

В прототипе ПО интерферометрической обработки РЛ данных среднего разрешения реализован метод линейной компенсации (грубый), то есть, по результатам анализа интерферограммы алгоритм рассчитывает средний градиент вдоль осей  $X$  и  $Y$ . По результатам анализа подсчитываются и применяются коэффициенты компенсации (рисунок 4.28).

При обработке необходимо учитывать, что области с низкой когерентностью (высоким уровнем фазового шума) могут исказить общую результирующую картину (дифференциальную интерферограмму или развернутую фазу), так как оценка характеристик интерферометрических полос может быть затруднена.

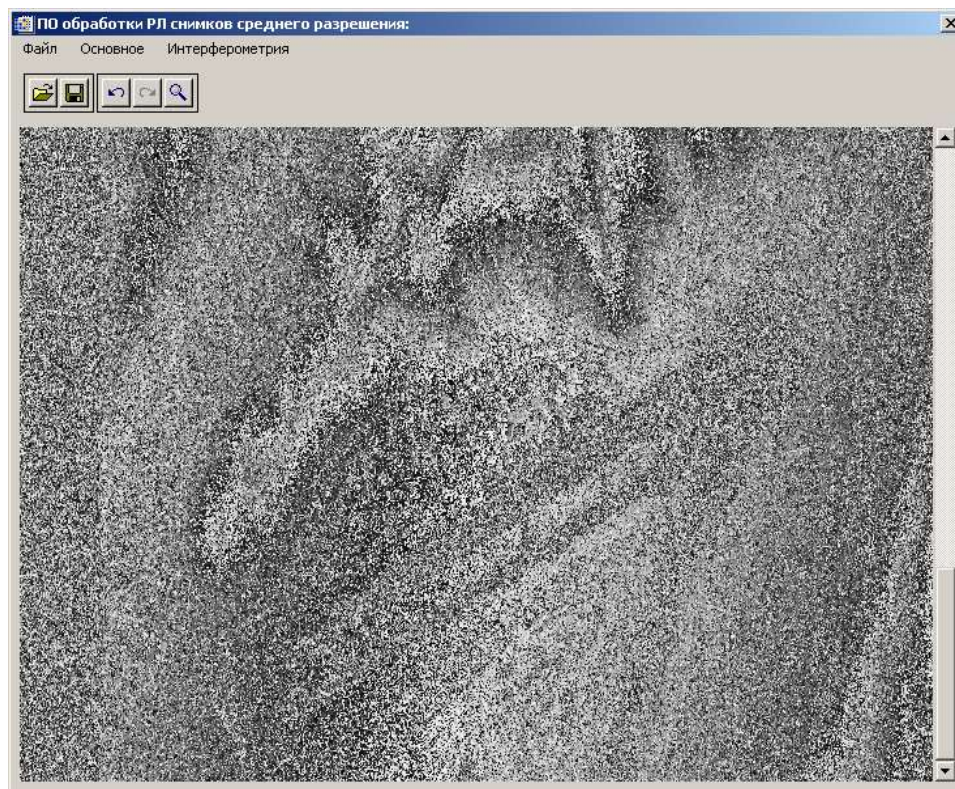


Рисунок 4.28 – Компенсация интерферограммы

В разрабатываемом прототипе ПО подсчет значения когерентности имеет смысл только для визуальной оценки качества входных данных, поэтому реализован с параметрами  $x=y=7$  (рисунок 4.29), маскирование интерферограммы по значению когерентности не производится.



Рисунок 4.29 – Карта когерентности с окном 7\*7

Фазовый шум, присутствующий на промежуточных и конечных продуктах интерферометрической обработки радиолокационных данных, состоит, как правило, из нескольких компонент, в число которых входят шумы аппаратуры, канала распространения радиоволн, системы обработки и пространственно-временной декорреляции снимков. Наличие фазового шума приводит к ухудшению разрешения по высоте в случае использования интерферометрической обработки для создания ЦМР или к ошибкам определения смещений поверхности в задачах дифференциальной интерферометрии. Подавление фазового шума может быть выполнено на нескольких этапах обработки [241], что обуславливается как применяемыми методами фильтрации, так и решаемыми задачами.

Существует ряд фильтров, как распространенных, так и специфических. Для фильтрации фазового шума могут использоваться различные алгоритмы [241]: локальные и глобальные, адаптивные и неадаптивные, линейные и нелинейные. Некоторые алгоритмы могут использовать дополнительные внешние данные, такие например, как маска затенений или маска обратных наклонов. Зачастую, при автоматической настройке параметров алгоритма рассчитывается и участвует в обработке такой параметр интерферограммы, как локальный коэффициент корреляции или когерентность. Выбор типа фильтра зависит не только от самого изображения, но и от геометрии съемки и выбранной территории для исследования. Обыкновенно необходимый тип фильтра определяется экспериментальным путем [241]. Например, для горной местности с большой крутизной склонов оптимальным является адаптивный фильтр с минимальным размером окна (3\*3 или 5\*5).

Считается, что фазовый шум на интерферограмме соответствует  $1/6$  длины волны. Однако величина фазового шума - индивидуальная характеристика каждой отдельно взятой интерферометрической пары. Так, например, фазовый шум на фрагменте снимка, соответствующему залесенной территории, значительно выше фазового шума участка снимка, соответствующего стационарно отражающим объектам.

Необходимо отметить, что при фильтрации неизбежно происходит ухудшение пространственного разрешения обрабатываемого изображения. Поэтому при задании параметров алгоритма фильтрации желательно принимать во внимание этот факт и избегать слишком интенсивной фильтрации интерферограммы [6, 241].

В разрабатываемом прототипе ПО реализован фильтр Голдстейна (Goldstein), который представляет собой спектральный фильтр, увеличивающий доминантные компоненты интерферометрических полос в локальной окрестности (рисунок 4.30). Для фильтрации фазового шума, обусловленного спектральным сдвигом, в простейшем случае, необходимо отфильтровать высокочастотную часть одного спектра и низкочастотную часть другого, предварительно совместив оба спектра путём их взаимного смещения на половину величины спектрального сдвига или частоты следования интерферометрических полос [241]. Фильтр Голдстейна очень эффективен для областей со сравнительно высокой когерентностью.

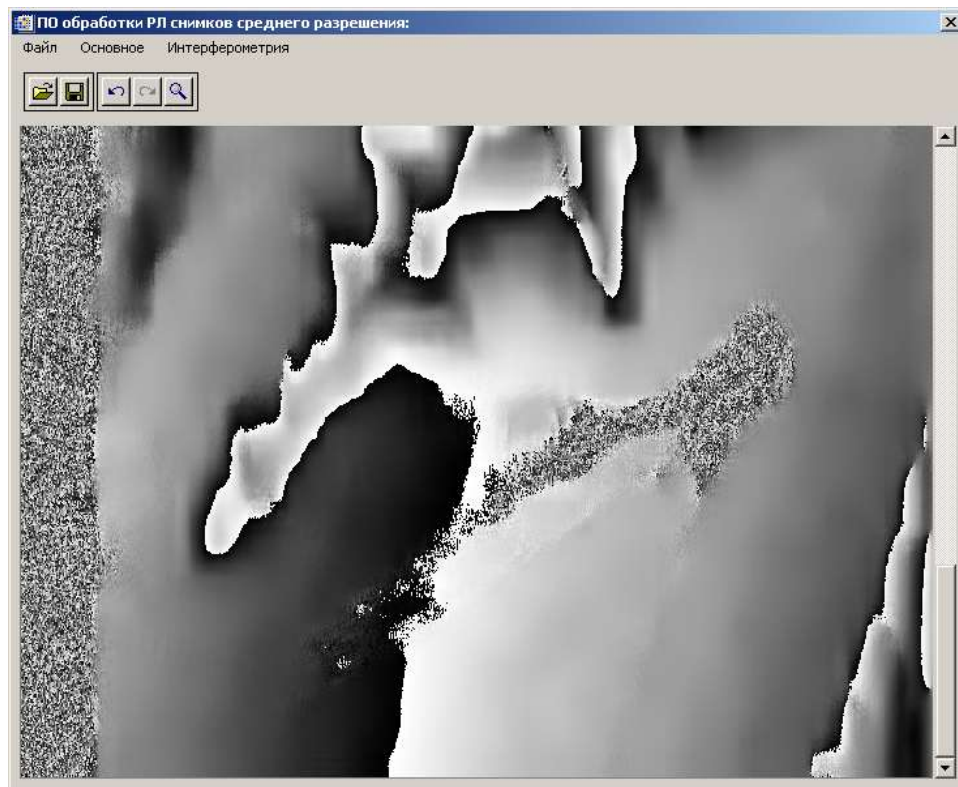


Рисунок 4.30 – Фильтр данных



Развертка фазы в разрабатываемом прототипе ПО происходит по следующему алгоритму:

1. Выполняется прямое двумерное дискретное косинусное преобразование массива значений  $\rho_{ij}$ , чтобы получить  $\rho'_{ij}$ .
2. Используя уравнение для  $\psi_{ij}$ , находится массив значений  $\psi'_{ij}$ .
3. Выполняется обратное дискретное косинусное преобразование массива  $\psi'_{ij}$ , чтобы вычислить искомый массив развернутых значений фазы  $\psi_{ij}$ .

Необходимо заметить, что невозможно подсчитать уравнение на  $\psi'_{ij}$  для случая  $i = 0, j = 0$ . На практике обычно полагают  $\psi'_{ij} = \rho'_{ij}$ .

Пример снимка с развернутой фазой приведен на рисунке 4.31..



Рисунок 4.31 – Развернутая фаза

Построение дифференциальной интерферограммы в разрабатываемом прототипе ПО обработки РЛ снимков среднего разрешения принципиально реализовано следующим образом:

1. Построение интерферометрической цепочки из 3-х или 4-х РЛ снимков.
2. Формирование новых, совмещенных между собой файлов.
3. Построение двух интерферограмм из 3-х или 4-х снимков.
4. Компенсация интерферограмм.
5. Фильтрация интерферограмм.
6. Разность интерферограмм.

По результатам совместного анализа интерферограмм формируется разностная (дифференциальная) интерферограмма.

Рассмотрим вопрос построения цифровых моделей местности/рельефа методом спутниковой радиолокационной интерферометрии.

На сегодняшний день существует различные типы материалов ЦММ, которые можно классифицировать по доступности рядовому пользователю [1]. Доступность материалов, главным образом, определяется их стоимостью и ограничениями на использование.

Наиболее предпочтительными для построения ЦМР/ЦММ являются материалы радарной съемки однопроходной интерферометрии (теоретически и практически). Антенны находятся на одном летательном аппарате. Подобный проект с однопроходной интерферометрией был реализован на космическом шаттле в феврале 2000 г. в течение 11 дней. Данная миссия носила название shuttle radar topographic mission (SRTM). Эта радарная топографическая съемка покрыла большую часть территории земного шара, за исключением самых северных (>60), самых южных широт (>54).

Радиолокационными сенсорами было собрано более 12 терабайт данных (что примерно равно объему информации библиотеки конгресса) [43].

Большая часть данных доступна бесплатно через FTP. Маска водных объектов находится в директории SWBD версии 2.

Версия 2 - <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2>

Версия 1 - <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1>

В первоначальные планы правительства США входило распространение данных с максимальным разрешением (30м, Level-2, 1 arcsecond), но, в связи с угрозой терроризма было принято решение распространять генерализованные данные с разрешением 90м (Level-1, 3 arcseconds) на всю отснятую территорию, кроме территории США, на которую данные распространяются с максимальным разрешением. На некоторые территории в США (общей площадью 50 000 км<sup>2</sup>) съемка вообще не производилась, что видимо также связано с вопросами национальной безопасности.

Таким образом, все сырые данные и данные с максимальным разрешением (т.н. Level-2) распространяются только через Министерство Обороны США.

Данные распространяются квадратами размером 1x1 градус, при максимальном доступном разрешении 3 арксекунды такой квадрат является матрицей размером 1201x1201 элементов (пикселей). Один дополнительный ряд является дублирующим и повторяется на соседней матрице.

Данные являются простым 16 битным растром (без заголовка), значение пикселя является высотой над уровнем моря в данной точке, пиксель также может принимать значение -32768, что соответствует значению no data (нет данных). Референц-эллипсоид данных - WGS84.

NASA объявило о выпуске второй версии комплекта данных srtm, созданного по материалам радиолокационной съемки, выполненной с борта американских шаттлов. Эта версия, которую агентство называет окончательной, была создана совместно с Агентством геопространственной космической разведки (NGA), и в отличие от предыдущей версии хорошо отображает водные поверхности и береговые линии, а также в значительной мере избавлена от «всплесков» и «провалов», связанных со сбойными пикселями. Последняя версия содержит новый набор векторных данных о береговых линиях (SWBD) в формате ESRI Shapefile. На рисунке 4.32 приведена схема покрытия территории Земли съемкой SRTM.

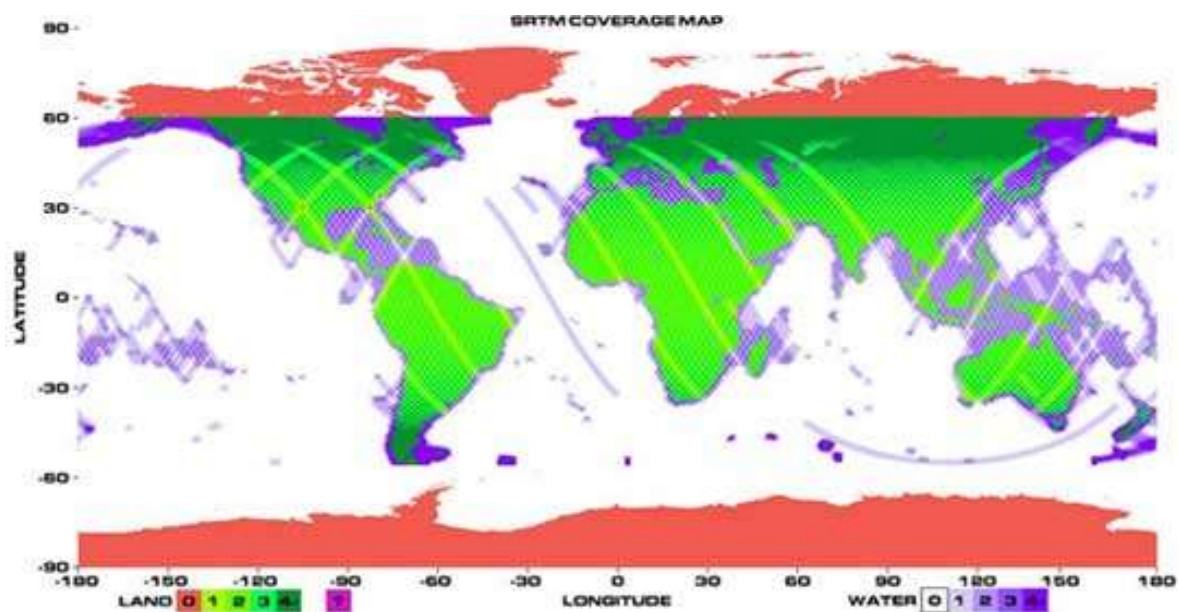


Рисунок 4.32 – Схема покрытия территории Земли съемкой SRTM (Land 0-1-2-3-4, Water 0-1-2-3-4 - сколько раз был снят участок земной или водной поверхности)

Для исходной модели SRTM с размером ячейки 30\*30 кв. метров абсолютная точность по высоте равна 16 метрам, относительная точность по высоте - 10 метрам, абсолютная горизонтальная точность - 20 метрам (расчет производился по нескольким участкам SRTM с различными типами местности, затем был генерализирован). Для территории Российской Федерации, где SRTM была заглублена до 3 арксекунд (размер ячейки около 90\*90 м<sup>2</sup>), точность модели, соответственно, ниже (рисунок 4.33).

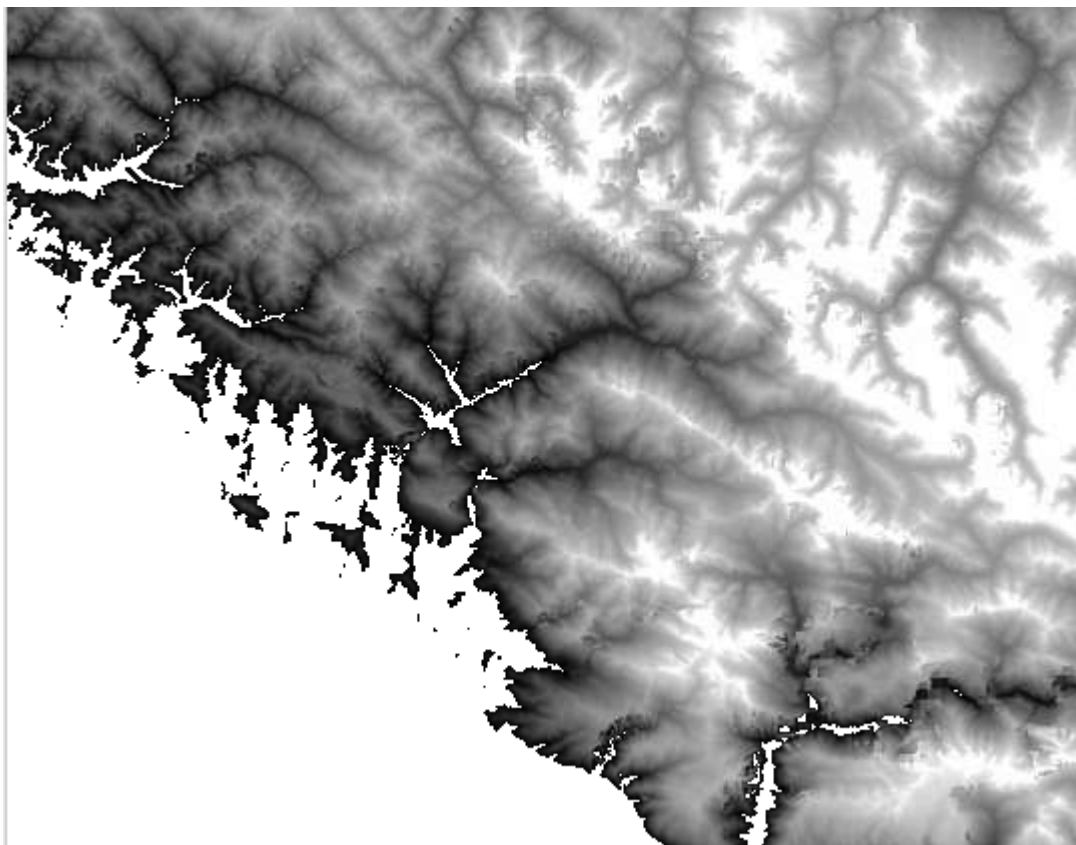


Рисунок 4.33 – Участок ЦМР SRTM на побережье Черного моря

К сожалению, в горных районах ЮФО, в том числе Туапсинском, Сочинском и Адлерском районах, имеется много мест, где эта съемка не удалась (требовались дополнительные проходы) вследствие часто меняющихся микроклиматических условий в высокогорных районах и прилегающих территориях, а также неподходящей для высокогорных районов геометрии съемки.

Дефекты полученной по результатам обработки цифровой модели интерполировались, однако качество постобработки не всегда было удовлетворительным.

Точность по высоте ЦМР SRTM прямо зависит от типа наблюдаемой местности; очевидно, что для равнинных территорий полученная ЦММ более точна, чем для горных районов. Это связано со сложностями обработки данных, в том числе развертки фазы в интерферометрической обработке, а также исходными данными, на которых наблюдаются артефакты: радарные тени, эффекты переналожения и т.д.

Моделью SRTM не покрыта часть северных территорий (как было отмечено ранее, покрытие SRTM ограничено по широте 60 градусом): большая часть Якутии.

Тем не менее, ввиду отсутствия в России глобальной цифровой карты высот, для решения многих задач использование SRTM оказывается целесообразным шагом.

Данные GTOPO30 представляют собой глобальную цифровую модель рельефа земной поверхности и являются результатом работы Американской Геологической Службы USGS и «EROS Data Center», Sioux Falls, штат Южная Дакота.

Значения высот в GTOPO30 соответствуют регулярной географической сетке с размером шага 30 секунд (приблизительно 1 километр) со следующими интервалами изменения координат:

- по широте:  $-90 \leq \varphi \leq 90$ ;
- по долготе:  $-180 \leq \lambda \leq 180$ .

Географическая сетка задана на опорный эллипсоид WGS84 со следующими параметрами:

- $a = 6378137.0$  м (большая полуось эллипсоида);
- $f = 1.0/298.2572235630$  (коэффициент сжатия эллипсоида);
- $GM = 0.3986004418 \cdot 10^{15} \text{ м}^3/\text{с}^2$  (гравитационная константа Земли без учета атмосферы);
- $\Omega = 7292115 \cdot 10^{-11} \text{ рад}/\text{с}$  (угловая скорость вращения Земли).

Общие размеры сетки составляют 21600 строк и 43200 столбцов. Значения высоты заданы в метрах над средним уровнем моря и изменяются в пределах от  $-407$  до  $8752$  метров; высота, соответствующая областям океанов задана величиной  $-9999$ . Под средним уровнем моря понимается значение высоты над опорным эллипсоидом общеземного геоида, соответствующего модели EGM96. В силу размеров шагов используемой координатной сетки отсутствуют данные для мелких островов, имеющих общую площадь менее  $1 \text{ км}^2$ . Для удобства использования все данные GTOPO30 разбиты на 33 раздела. Области, лежащие в пределах  $[-60, 90]$  по широте и  $[-180, 180]$  по долготе описываются 27 разделами, каждый из ко-

торых имеет размеры, соответствующие по широте и по долготе. Остальные шесть разделов описывают область Антарктиды (широта:  $-90 \leq \varphi \leq -60$ , долгота:  $-180 \leq \lambda \leq 180$ ), каждый из которых имеет размеры, соответствующие 30 градусам по широте и 60 градусам по долготе. Имена разделов задаются координатами верхнего левого угла (например, E020N40 означает восточной долготы и северной широты). Все упомянутые разделы заданы в географической проекции с использованием эллипсоида WGS84. Кроме того, имеется один дополнительный раздел, описывающий континент Антарктиды полностью и заданный в полярной стереографической проекции с использованием эллипсоида WGS84.

На рисунке 4.34 представлена структура разбиения цифровой модели ГТОРО30 на разделы.

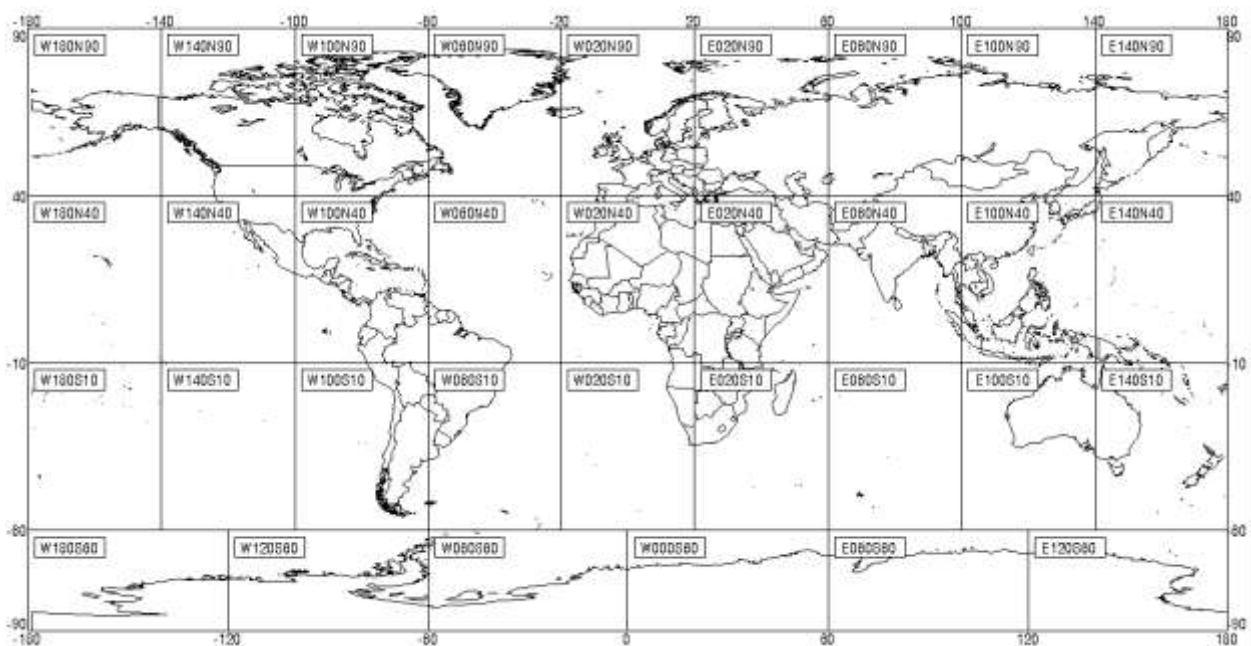


Рисунок 4.34 – Структура разбиения ЦМР ГТОРО30

Построение цифровых моделей рельефа/местности по цифровым материалам спутника ENVISAT (сенсор ASAR) осуществлялось в пакете SARscape (тестовая версия) по методу 2-х проходной дифференциальной интерферометрии.

Входными данными служили 19 отобранных снимков, покрывающих участок железной дороги «Адлер-Туапсе» в период с 1995 по 2007 гг.

В таблице 4.13 приведен список интерферометрических пар, обработка которых была произведена из-за их приемлемого качества.

Таблица 4.13 – Список удовлетворительных интерферометрических пар ENVISAT

	<b>Интерферометрическая пара</b>	<b>Перпендикулярная составляющая базовой линии, метры</b>	<b>Когерентность в анализируемом участке (среднее значение)</b>
1	15.04.2004/20.05.2004	46.750	0.17
2	16.12.2004/24.02.2005	142.131	0.18
3	11.11.2003/24.02.2004	40.025	0.22
4	24.02.2004/04.05.2004	73.622	0.23
5	18.04.2004/01.08.2004	108.153	0.13
6	19.12.2004/27.02.2005	53.365	0.17
7	23.10.2007/27.11.2007	340.146	0.12

Район интереса (и обработки) представляет собой вырезанный фрагмент из полной сцены вдоль береговой линии Черного моря. В среднем, ширина анализируемой полосы составляет 10 километров.

Вследствие того, что район исследования обладает достаточно сложным рельефом, величина когерентности вдоль береговой линии, в районе расположения железнодорожных путей, существенно превышает среднее значение по фрагменту, указанное в таблице 4.14.

Оценка точности построения цифровых моделей местности проводилась путем сравнения с существующей моделью SRTM, приведенной к разрешению 20 метров в плане (размер ячейки).

Оценка среднеквадратического отклонения для полученных ЦММ не производилась из-за нецелесообразности: данные спутника ENVISAT не являются исходными материалами для построения цифровых моделей местности (рельефа).



Таблица 4.14 –Цифровая модель местности по паре от 15.04.2004/20.05.2004

Параметр	Значение
Окно усреднения интерферограммы	7*7
Сигнал/шум	0,25
Отсечение по когерентности	-
Окно интерполяции ЦММ	9*9
Размер окна когерентности	7*7
Средняя величина когерентности вдоль береговой линии	0,4

На рисунке 4.35 приведена карта когерентности на анализируемый фрагмент изображения, полученная путем совместного анализа снимков интерферометрической пары. Размер окна, которым производился подсчет когерентности – 7 пикселей. Полученная интерферограмма была компенсирована с использованием орбитальных параметров (точная компенсация).

По всему полю интерферограммы наблюдаются значительные фазовые шумы, что сделало необходимым осуществить фильтрацию фазового шума большим по размеру окном. Как видно из рисунка 4.36, хорошая интерферометрическая картина (размер окна адаптивного фильтра – 7 пикселей) наблюдается не на всей территории.

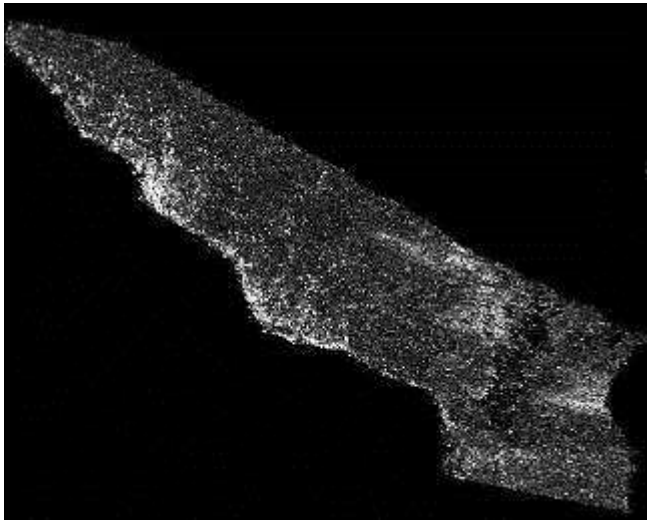


Рисунок 4.35 – Карта когерентности

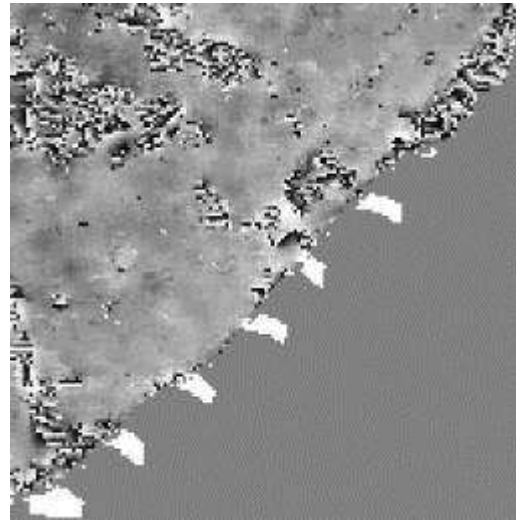


Рисунок 4.36 – Фрагмент компенсированной интерферограммы

Из-за несвязности областей с высокой когерентностью и хорошей интерференционной картиной, для построения ЦММ применялась ручная коррекция развернутой фазы, позволяющая устранить 2- $\pi$  неоднозначность.

На рисунке 4.37 приведена цифровая модель местности, полученная по данным радарной съемки спутником ENVISAT 15.04.2004/20.05.2004 с размером ячейки 20 метров. Желтой линией обозначена железная дорога Туапсе-Адлер, полученная по топографической карте масштаба 1: 200 000.

Из-за небольшой базовой линии между спутниками в моменты съемок (перпендикулярная составляющая 46.750 метров), полученная цифровая модель рельефа имеет существенную ошибку по высоте.

Для оценки ошибки построения ЦММ была использована ЦМР SRTM как опорная. Обе цифровые модели были приведены к единому пространственному разрешению (размеру ячейки), затем было произведено вычитание полученной ЦМР из SRTM. На рисунке 4.38 показана карта ошибок интерферометрической ЦММ.

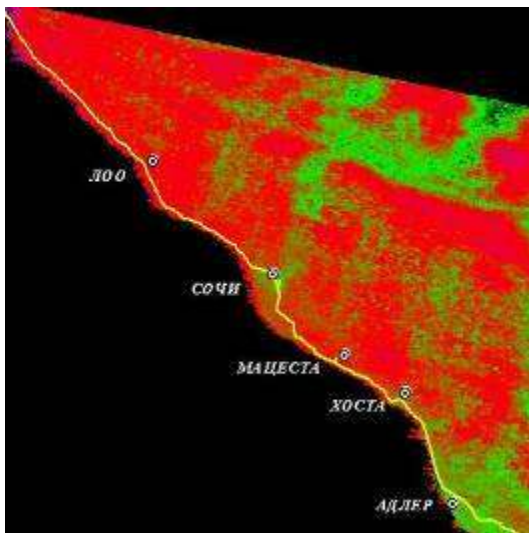


Рисунок 4.37 – Фрагмент ЦММ в псевдоцвете

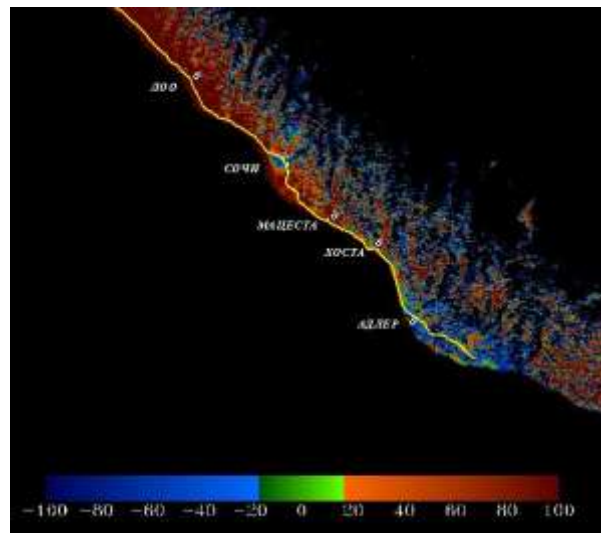


Рисунок 4.38 – Карта ошибок полученной ЦММ

Распределение ошибки можно описать следующим образом: в высокогорных районах разность опорной ЦМР и ЦММ, полученной интерферометрическим методом, максимальна, что объяснимо с точки зрения основ интерферометрии: из-за небольшого расстояния между спутниками в моменты съемок наблюдается интерферометрическая картина с полосами, частота которых низка, что не позволяет восстановить в должной степени картину рельефа (Сочи-Хоста).

Для районов, где перепады высот менее существенны, наблюдается уменьшение ошибки (Хоста-Адлер). Это связано с тем, что низкая частота интерферометрических полос позволяет восстановить рельеф точнее. Основным источником ошибок для данной интерферометрической пары для построения ЦММ – маленькая базовая линия.

Построение цифровых моделей рельефа по радарным снимкам с достаточно большим временным разрывом (более суток) – процесс в большой мере случайный, так как оценить временную декорреляцию можно только по результатам сопоставления двух и более снимков. Для С-диапазона этот факт достаточно важен по причине сравнительно небольшой длины волны (около 5 сантиметров).

Использовать полученные материалы для внедрения в ГИС-проект не целесообразно. Также, принимая во внимание долгий срок службы существующего ныне спутника ERS-2, использовать его для оперативного мониторинга не стоит, однако анализ архивных материалов открывает пути к пониманию происходящих сегодня опасных геологических и техногенных процессов.

Построение цифровых моделей местности проводилось по следующим интерферометрическим парам (таблица 4.15).

Таблица 4.15 – Удовлетворительные интерферометрические пары ENVISAT

	<b>Интерферометрическая пара</b>	<b>Базовая линия, метры</b>
<b>1</b>	<b>1995.08.15/1995.09.19</b>	<b>350.778</b>
<b>2</b>	<b>1995.08.14/1995.09.18</b>	<b>538.951</b>
<b>3</b>	<b>1999.04.06/1999.05.11</b>	<b>208</b>
<b>4</b>	<b>1999.05.11/1999.09.28</b>	<b>79.931</b>
<b>5</b>	<b>2000.10.17/2000.11.21</b>	<b>583,898</b>
<b>6</b>	<b>2003.04.15/2003.07.29</b>	<b>561.473</b>
<b>7</b>	<b>2003.10.07/2003.11.11</b>	<b>313.343</b>
<b>8</b>	<b>2004.08.17/2004.09.21</b>	<b>247.124</b>
<b>9</b>	<b>2005.06.28/2005.08.02</b>	<b>51.505</b>
<b>10</b>	<b>2006.05.09/2006.06.13</b>	<b>362.000</b>
<b>11</b>	<b>2006.07.18/2006.09.26</b>	<b>235.862</b>

Методика, которая использовалась при обработке данных – 2-проходная радиолокационная интерферометрия. Прочие интерферометрические пары проиллюстрировали плохую когерентность, их интерферометрическая обработка не имеет смысла.

Наилучший результат среди перечисленных интерферометрических пар показали группы 7, 6, 8. Результат с наибольшей ошибкой показали группы 9, 4, 3. Очевидно, что требование по базовым линиям существенно отражается на качестве получаемого результата.

В силу того, что 35-дневный временной разрыв может оказать критическое влияние на результат обработки данных ERS, строить цифровые модели местности с использованием данного спутника нецелесообразно при наличии альтернативы (как существующих цифровых материалов, так данных оптического зондирования высокого разрешения) [46].

Однако, как видно из предыдущих результатов обработки РЛ данных среднего разрешения, качество получаемой интерферометрическим методом ЦММ зависит и от геометрических параметров съемки. Малая базовая линия неизбежно влечет за собой ошибки восстановления рельефа, особенно в высокогорных районах. Проводить оценку ошибки в глобальном смысле для полученных моделей рельефа не целесообразно, так как временной разрыв между съемками составляет 35 дней и более, а геометрия съемки не фиксирована.

Оценку качества имеет смысл проводить путем сравнения с общедоступной ЦМР SRTM.

Таблица 4.16 – Цифровая модель рельефа по паре от 1995.08.15/1995.09.19

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Окно усреднения интерферограммы	7*7
Сигнал/шум	0,25
Отсечение по когерентности	0,3
Окно интерполяции ЦММ	7*7
Размер окна когерентности	7*7
Средняя величина когерентности вдоль береговой линии	0,28

На рисунке 4.39 приведена карта когерентности на область перекрытия снимков интерферометрической пары, полученная путем совместного анализа снимков интерферометрической комбинации. Размер окна, которым производился подсчет когерентности – 7 пикселей.

Полученная по результатам сравнения снимков интерферограмма была компенсирована с использованием орбитальных параметров (точная компенсация). По всему полю интерферограммы наблюдаются значительные фазовые шумы, что сделало необходимым осуществить фильтрацию фазового шума большим по размеру окном (размер окна адаптивного фильтра – 7 пикселей). Как видно из рисунка 4.40, хорошая интерферометрическая картина наблюдается не на всей территории, а только в областях с высокой степенью когерентности.

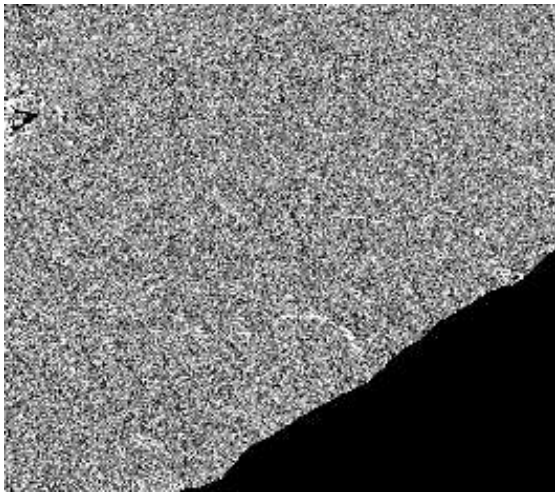


Рисунок 4.39 – Фрагмент карты когерентности

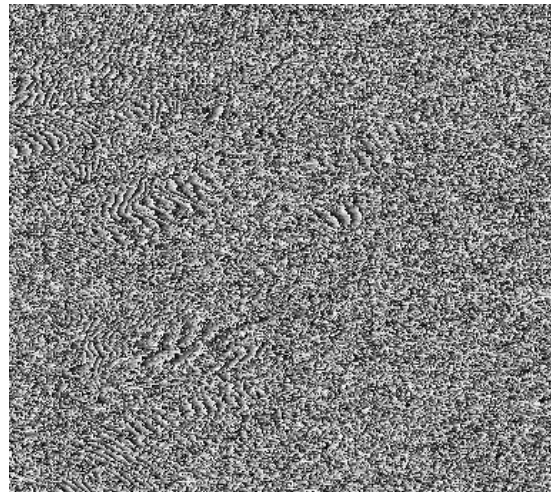


Рисунок 4.42 – Фрагмент интерферограммы

Вследствие несвязности областей с высокой когерентностью и хорошей интерференционной картиной, для построения ЦММ применялась ручная коррекция развернутой фазы, позволяющая устранить  $2\pi$ -неоднозначность.

На рисунке 4.41 приведена цифровая модель местности, полученная по данным радарной съемки спутником ERS-2 1995.08.15/1995.09.19 с размером ячейки 20 метров. Желтой линией обозначена железная дорога Туапсе-Адлер, полученная по топографической карте масштаба 1: 200 000.

Для оценки ошибки построения ЦММ была использована ЦМР SRTM как опорная. Обе цифровые модели были приведены к единому пространственному разрешению (размеру ячейки), затем было произведено вычитание полученной ЦМР из SRTM. На рисунке 4.42 показана карта ошибок интерферометрической ЦММ.

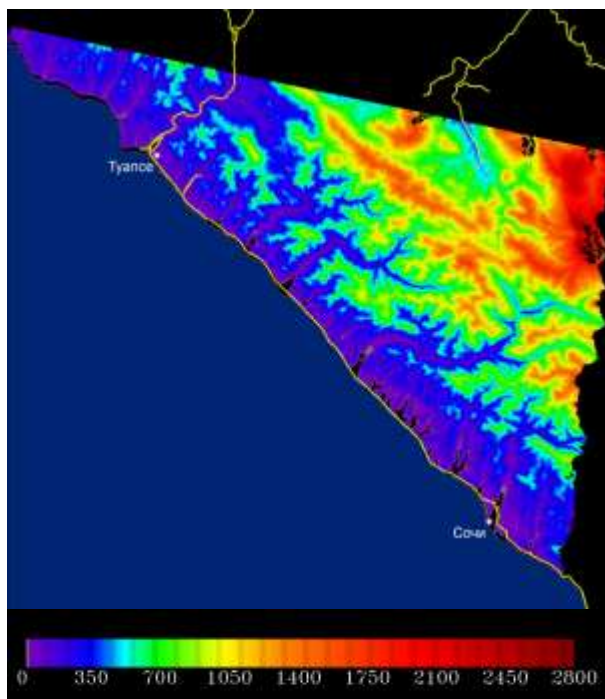


Рисунок 4.43 – ЦММ в псевдоцвете

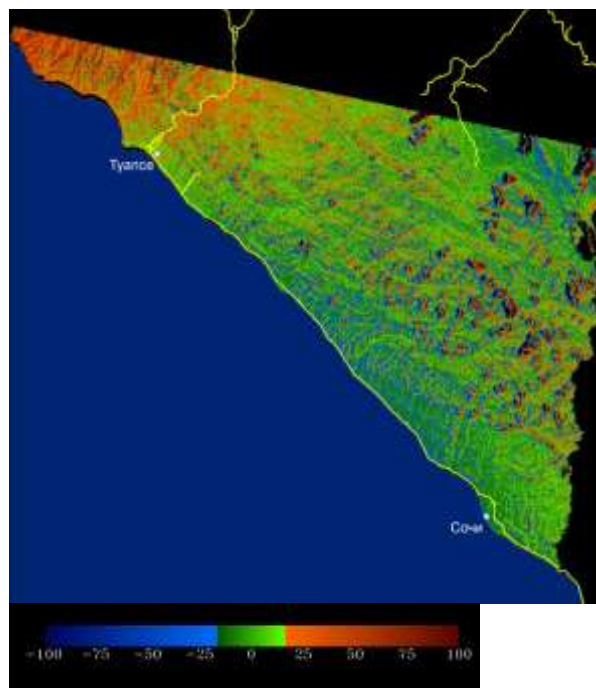


Рисунок 4.44 – Карта ошибок полученной ЦММ

Распределение ошибки можно описать следующим образом: в высокогорных районах разность опорной ЦМР и ЦММ, полученной интерферометрическим методом, максимальна, что объяснимо с точки зрения основ интерферометрии: из-за недостаточно большого расстояния между спутниками в моменты съемок наблюдается интерферометрическая картина с полосами, частота которых низка, что не позволяет восстановить в должной степени картину рельефа.

На карте ошибок четко наблюдается корреляция с рельефом территории – ошибка увеличивается на склонах (в большей мере обратных) гор из-за эффекта радарных теней и переналожения радиосигнала при формировании изображения.

Для районов, где перепады высот менее существенны, наблюдается уменьшение ошибки. Основной источник ошибок для данной интерферометрической

пары для построения ЦММ – временная декорреляция (изменение геометрических свойств рассеивателей) и недостаток по величине базовой линии.

Для данной ЦММ была произведена оценка среднеквадратического отклонения с использованием топографической карты масштаба 1:50 000. Использовалось 15 контрольных точек. СКО составило 63 метра.

### **4.3 Методика выявления очагов зарождения чрезвычайных ситуаций путем определения деформаций рельефа по материалам спутниковой радиолокационной съемки**

Рассмотрим методику определения деформаций рельефа по материалам спутниковой радиолокационной съемки среднего разрешения интерферометрическими методами.

Все наблюдаемые деформации на картах смещений, получаемых в С-диапазоне (ERS-1/2, ENVISAT) мы можем разделить на 4 основные группы:

1. Деформации как результат эндогенных процессов, например, вследствие движения тектонических плит, геодинамических колебаний земной коры. Эти деформации характеризуются значительными величинами (порядок – сантиметры в год), представляют собой как деформации в произвольных направлениях.

2. Деформации как результат экзогенных процессов. Характерные величины смещений – до сантиметра в год, представляют собой деформации в произвольных направлениях.

3. Деформации как результат техногенного воздействия на объекты наблюдения. Обыкновенно эти деформации представляют собой просадки почв по порядку до сантиметра в год на объектах с техногенным воздействием. Обыкновенно имеют локальное распределение.

4. Деформации, появившиеся из-за ошибок интерферометрического метода, характерны для зон с низкой когерентностью. Диапазон деформаций широк и охватывает даже десятки сантиметров. Могут появляться как из-за низкого качества интерферометрической пары, так и ошибок обработки.

Интерпретация полученных данных должна позволять разделять потенциально-опасные деформации, вызванные различными техногенными и/или геологическими процессами и представляющими угрозу для железнодорожной инфраструктуры, и смещения, не представляющие объективной опасности для железнодорожного транспорта, а также «ложные» смещения (ошибки интерферометрического метода) [119].

Таким образом, методика интерферометрической обработки РЛ данных среднего разрешения была пополнена анализом. Он включает в себя сопоставление полученной карты сдвиговых деформаций вдоль линии «Земля - Спутник» с векторным слоем, соответствующим железнодорожному полотну, а также картой когерентности.

Для выявления смещений поверхности необходимо сопоставить два радиолокационных снимка, сделанных до и после предполагаемых смещений. Кроме того, потребуется опорная цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная по результатам более ранних съёмов. На основе снимков и ЦМР с помощью метода дифференциальной интерферометрии можно выявлять смещения поверхности сантиметрового и миллиметрового масштаба. Однако при этом необходимо учитывать возможные помехи и погрешности, которые влияют на качество радиолокационных снимков и, как следствие, результаты интерферометрии.

Одной из важнейших характеристик, которые используются для оценки качества радиолокационной интерферометрии, является понятие *когерентности*. Формально, когерентностью называется коэффициент корреляции двух радиолокационных снимков:

$$C = \frac{E(S_1 \cdot S_2)}{\sqrt{E|S_1|^2 E|S_2|^2}},$$

где  $E(\cdot)$  - оператор усреднения. По сути же это мера сходства двух снимков между собой, которая принимает значения из интервала  $[0,1]$ , и чем меньше значение когерентности, тем менее схожи между собой снимки, и тем менее достоверна информация, полученная с их помощью. Заметим, что когерентность можно



рассчитывать не для всего снимка, а лишь для некоторой его малой части, например, окрестности заданного пикселя. Таким образом, можно построить карту когерентности, которая будет содержать информацию о когерентности в различных частях зоны съёмки. Ценность такой карты заключается в том, что при извлечении информации о рельефе в некоторой области исследователь может видеть насколько достоверной является данная информация.

Метод дифференциальной интерферометрии реализован на предварительной стадии анализа спутниковых снимков, и в качестве исходных данных для выявления критических деформаций земной поверхности используются карта смещений  $Z = \{z_{i,j}\}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$  и карта когерентностей  $C = \{c_{i,j}\}$ . Карта смещений – это, по сути, таблица, ячейка  $z_{i,j}$  которой содержит информацию о том, насколько изменилось за период между съёмками расстояние от анализируемой точки до спутника в момент первой съёмки в зоне местности, соответствующей пикселю снимка  $(i, j)$ . Здесь  $N$  и  $M$  – количество пикселей по горизонтали и вертикали соответственно. Ячейка  $c_{i,j}$  карты когерентностей содержит значение когерентности в окрестности пикселя  $(i, j)$ . Кроме того, предполагается заданной дополнительная карта, в которой указаны координаты прохождения железнодорожных путей [217].

Здесь необходимо определить понятие критической деформации. Будем говорить, что имеет место критическая деформация поверхности Земли, если разница между смещениями поверхности в двух соседних зонах превышает по модулю некоторый допустимый уровень  $d^*$ . То есть, если пиксели  $(i_1, j_1), (i_2, j_2)$  являются соседними на снимке и относительный сдвиг  $|z_{i_1, j_1} - z_{i_2, j_2}|$  таков, что  $|z_{i_1, j_1} - z_{i_2, j_2}| > d^*$ , то в зоне между пикселями имеет место критическая деформация.

Для выявления критических деформаций в зоне прохождения железнодорожных путей на первом этапе анализа на карте смещений необходимо отделить только те пиксели, которые соответствуют зоне путей, что делается с помощью данной дополнительной карты. В результате получается новый массив смещений

$Z' = \{z'_i\}, i = 1, \dots, n$  и соответствующий ему массив (профиль) когерентностей  $C' = \{c'_i\}$ . Далее по массиву (профилю) смещений  $Z'$  строится массив относительных сдвигов  $D = \{d_i = |z'_{i+1} - z'_i|\}, i = 1, \dots, n-1$ . На следующем этапе, в массиве относительных сдвигов необходимо выделить те значения, которые превышают критическое значение  $d^*$ .

Здесь необходимо учесть, что значения деформаций получены не точно, а с некоторой погрешностью, которые неизбежны при реализации метода дифференциальной интерферометрии. Заметим, что явная статистическая оценка погрешности чрезвычайно трудоёмка, однако в нашем распоряжении имеется массив когерентностей, которые позволяют определить насколько достоверны значения смещений, а следовательно и сдвигов. Поэтому, для каждого «подозрительного» значения относительного сдвига, превысившего критическое, требуется рассмотреть соответствующие значения когерентности в данном пикселе и соседних. Для этого необходимо заранее задать некоторое пороговое значение когерентности  $\hat{c}$ . И если, например, относительный сдвиг  $d_j = |z_{j+1} - z_j|$  таков, что  $d_j > d^*$ , то будем рассматривать значения когерентности  $c_{j-1}, c_j, c_{j+1}, c_{j+2}$  и сравнивать их с  $\hat{c}$ . При  $c_k > \hat{c}, k = j-1, j, j+1, j+2$ , можно с большой долей достоверности утверждать, что в зоне соответствующей пикселям  $j, j+1$  имеет место критическая деформация. Предлагаемый алгоритм позволяет выявить наличие критической деформации лишь в тех точках в зоне съёмки, где это может быть подтверждено высоким значением когерентности. К сожалению, при проведении радиолокационной съёмки неизбежны помехи и погрешности, вследствие которых возникают зоны низкой когерентности. Именно поэтому в таких зонах невозможно построение достоверных оценок величин сдвигов и выявление критических деформаций [217]. В качестве решения можно предложить проведение повторной съёмки при условиях, способствующих более низкому уровню помех.

Схематично данный алгоритм представлен на рисунке 4.45.



Рисунок 4.45 – Алгоритм определения «критических деформаций»

Удобным средством визуализации при анализе результатов обработки данных является диаграмма, где вдоль одной оси ординат откладывается величина относительного сдвига в каждом пикселе, а вдоль оси абсцисс – минимальное значение когерентности, вычисленное по значениям в четырех соседних с данным пикселем. Таким образом, можно наглядно видеть все пиксели на одной диаграмме, находить пиксели с большими значениями сдвигов и сразу же видеть достоверность такого значения [217].

Отбор пикселей с критическими деформациями можно также сделать наглядным с помощью такой диаграммы. Накладывая ограничение на критическую деформацию и устанавливая пороговое значение когерентности, мы, по сути, проводим *кривую селекции* (рисунок 4.46). Пиксели, находящиеся выше и правее такой кривой, выбираются в качестве имеющих критическую деформацию.

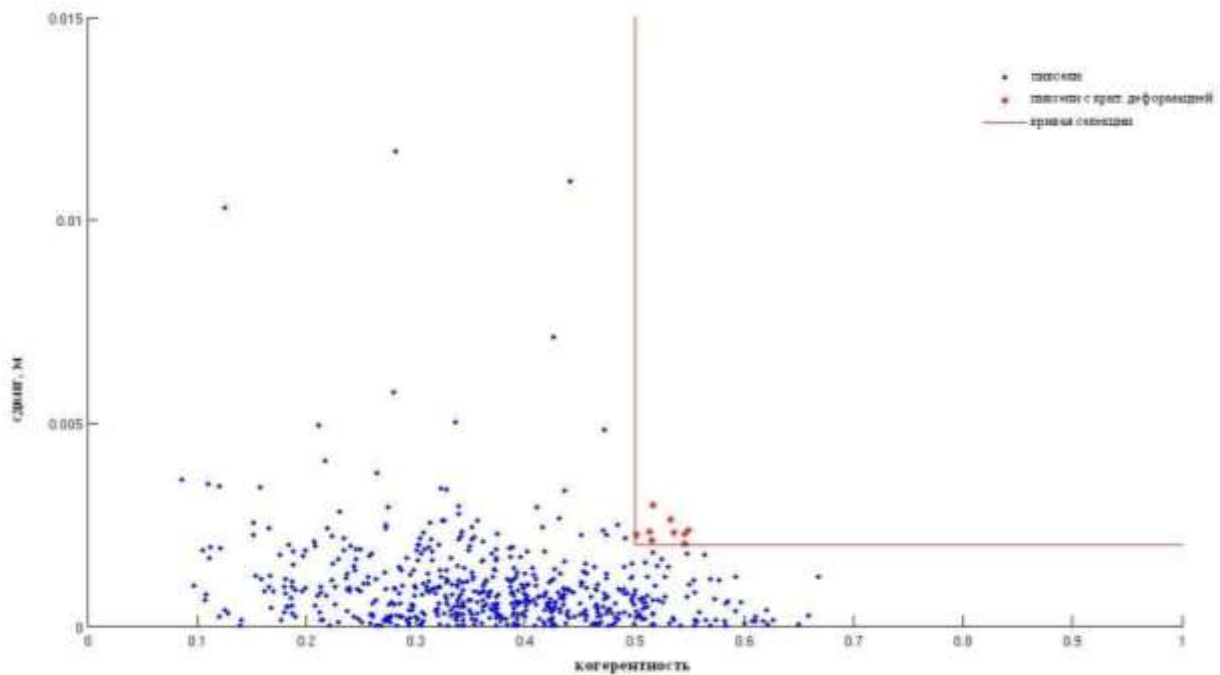


Рисунок 4.46 – Диаграмма критических деформаций

Предложенный алгоритм и методика вообще обладают рядом достоинств. В частности, устойчивостью по отношению к глобальным смещениям поверхности, например движениям тектонических плит. То есть наличие таких смещений не сказывается на качестве проводимых расчетов. То же самое относится и к возможной постоянной компоненте в ошибке оценки смещений при реализации метода дифференциальной интерферометрии. Далее, не вдаваясь в технические детали, заметим, что при построении карты смещений возможны проблемы с определением направления уклона рельефа, это так называемая ошибка развёртки фазы. Предлагаемая методика также позволяет обходить последствия этой проблемы.

Заметим, что разработанная методика имеет большой потенциал и может быть развита по целому ряду направлений. В качестве наиболее перспективного в ближайшее время отметим усовершенствование методики, при котором в оценке величин относительных сдвигов будут использоваться данные не только по пик-

селям, соответствующим железнодорожному полотну, но и пиксели из более широкого «коридора». Также планируется использовать значения когерентности для соответствующих пикселей. Такое усовершенствование позволит повысить точность оценок и достоверность принятия решений. Кроме того, возможны статистические интерпретации карты когерентностей, когда величины когерентностей, характеризующие достоверность информации, преобразуются в вероятностные характеристики ошибки расчетов.

При построении карт смещений по материалам спутника ENVISAT использовались файлы уточненных орбит, позволяющие минимизировать ошибки в определении абсолютных фаз.

Деформации определялись методом 2-х проходной дифференциальной интерферометрии из-за требования достаточно высокой корреляции всех исходных данных. Это требование трудно реализуемо в случаях 3-х и 4-х проходной дифференциальной интерферометрии из-за небольшой длины волны и значительного интервала между съемками - минимум 35 дней.

Обработка по методам 3-х и 4-х проходной дифференциальной интерферометрии не показала удовлетворительного результата.

Обработка производилась в пакете SARscape (тестовая версия), выходные данные - карты смещений как вдоль линии наблюдения со спутника.

Построенная по результатам сравнения двух снимков и цифровой модели SRTM карта смещений рельефа показана на рисунке 4.47. Очевидно, что деформации вдоль береговой линии носят незначительный порядок и соответствуют областям со сравнительно высоким значением уровня когерентности (полагалось, что когерентность ниже 0,25 соответствует областям с существенными фазовыми помехами).

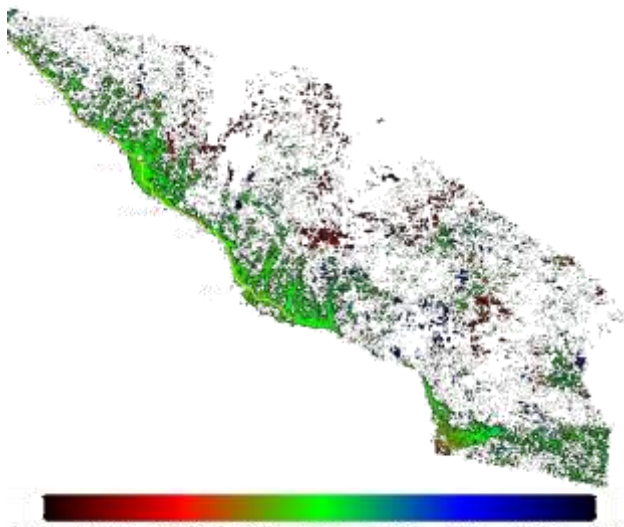


Рисунок 4.4 – Карта смещений

Параметры съемки	
Угол наблюдения к надиру, градусы	23
Базовая линия, метры	46,750
Временной разрыв, дни	35
Параметры обработки	
Пороговая когерентность	0,25
Использование файла точной орбиты	Да

Вдоль линии железнодорожного полотна был построен профиль когерентности фаз. Когерентность вдоль железнодорожного полотна для данной пары нестабильна, что обусловлено временной декорреляцией, включающей в себя как изменение геофизических характеристик отражающей поверхности, так и изменением геометрии отражающих объектов, что существенно для С-диапазона.

В результате первого этапа обработки были получены перечисленные ниже массивы смещений и когерентностей (рисунки 4.48 и 4.49).

Построенный по карте деформаций профиль смещений показывает незначительные деформации поверхности – смещения вдоль линии наблюдения со спутника (просадки) до минус 1 сантиметра, однако содержит и заведомо ошибочные значения. Так, в областях с низкой когерентностью наблюдаются величины смещений до 2 сантиметров в сторону спутника.

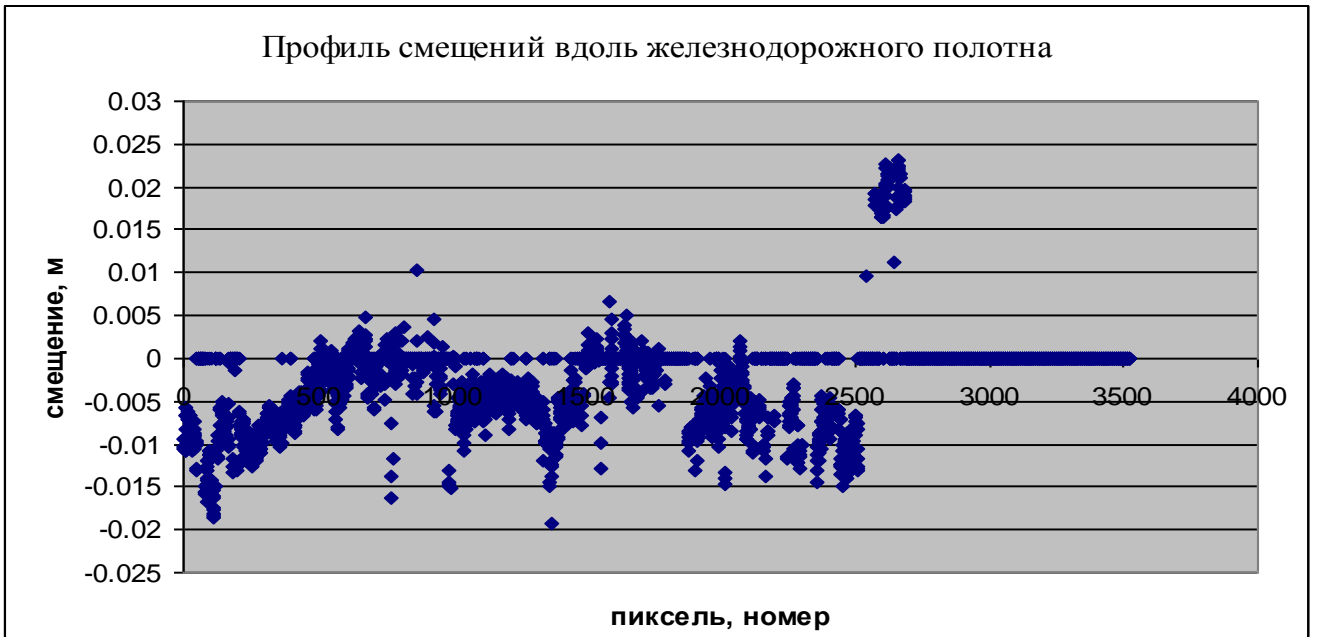


Рисунок 4.48 – Профиль смещений вдоль железнодорожного полотна

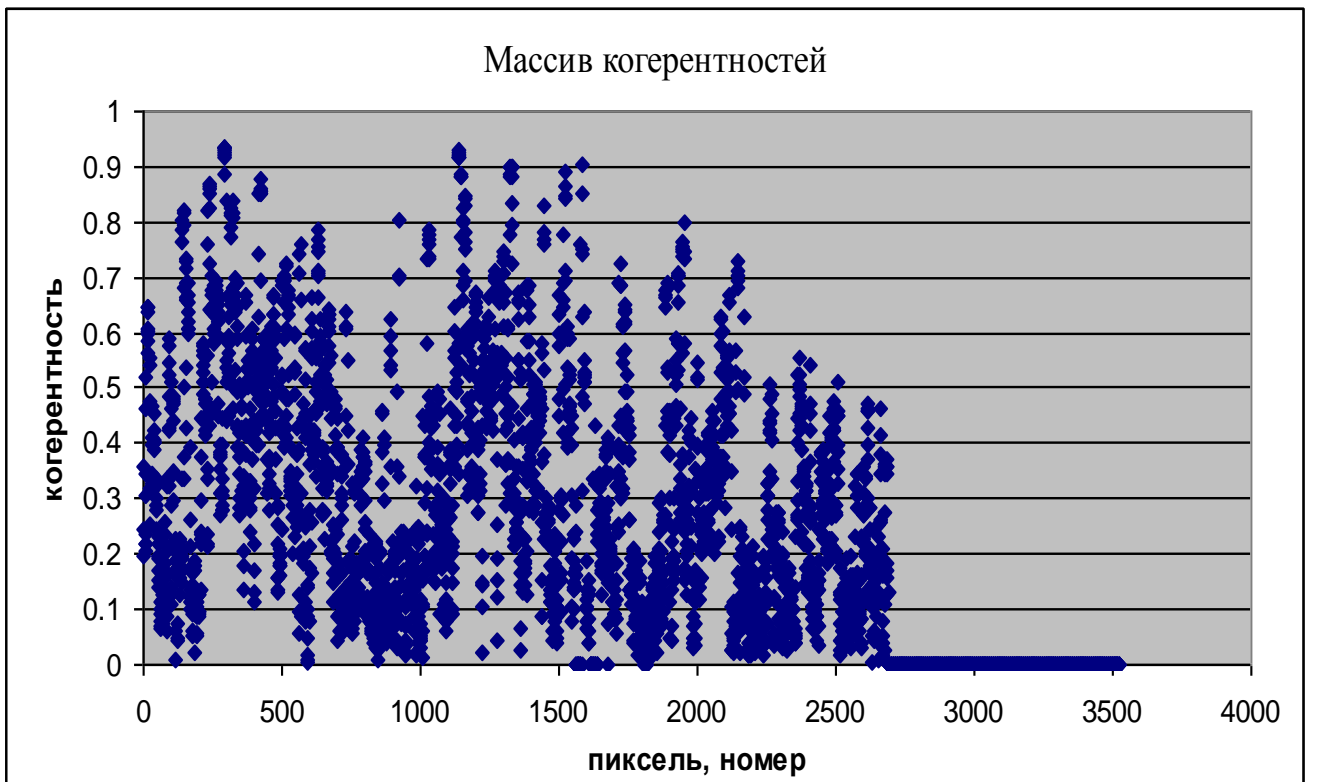


Рисунок 4.49 – Массив когерентности

По разрабатываемой методике «критических деформаций» был построен массив относительных деформаций вдоль и в непосредственной близости от железнодорожного полотна (рисунок 4.50).



Рисунок 4.50 – Массив относительных сдвигов

Далее из массива деформаций были отобраны все значения, превышающие критический уровень  $d^*=0,0025$  для которых были проверены соответствующие значения когерентности (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Отобранный массив деформаций

Номер пикселя, $j$	Модуль величины сдвига, м	Значения когерентности				Координаты
		$j-1$	$j$	$j+1$	$j+2$	
565	2.5100e-03	7.0954e-01	7.4253e-01	7.6023e-01	6.5899e-01	43°30'4.59"N 39°52'51.49"E
1446	2.5380e-03	7.7063e-01	7.8042e-01	8.2897e-01	5.3334e-01	43°37'2.99"N, 39°43'0.62"E
1586	6.2080e-03	6.2947e-01	7.4318e-01	9.0566e-01	8.5284e-01	43°38'8.47"N, 39°41'14.29"E
1587	3.0930e-03	7.4318e-01	9.0566e-01	8.5284e-01	5.4989e-01	43°38'9.76"N, 39°41'14.30"E

Для выписанных выше номеров пикселей величина деформации превышает критический уровень, а значения когерентности в окрестности превышает пороговое значение  $\hat{c}=0.5$ . Таким образом, мы можем с большой достоверностью



утверждать о наличии критических деформаций земной поверхности в зонах, соответствующих отобраным пикселям.

Ниже, на рисунке 4.51, приведена диаграмма критических деформаций, построенная в соответствии с разработанной методикой. Критические деформации выделены на ней красным цветом. Наибольший интерес вызывает точка со значением деформации (перепадом высот между соседними пикселями) в 6 миллиметров, а также соседняя, где перепад достигает 3 миллиметров. Эти точки соответствуют участку железной дороги Сочи – Дагомыс (пос. Мамайка).

Точка с критической деформацией 2,53 мм соответствует г. Сочи. Возможно, эта деформация есть следствие совокупного влияния техногенных и геологических факторов.

Перечисленные в таблице 4.17 точки отражены на обзорной карте деформаций железнодорожного полотна и областей в непосредственной близости от него.

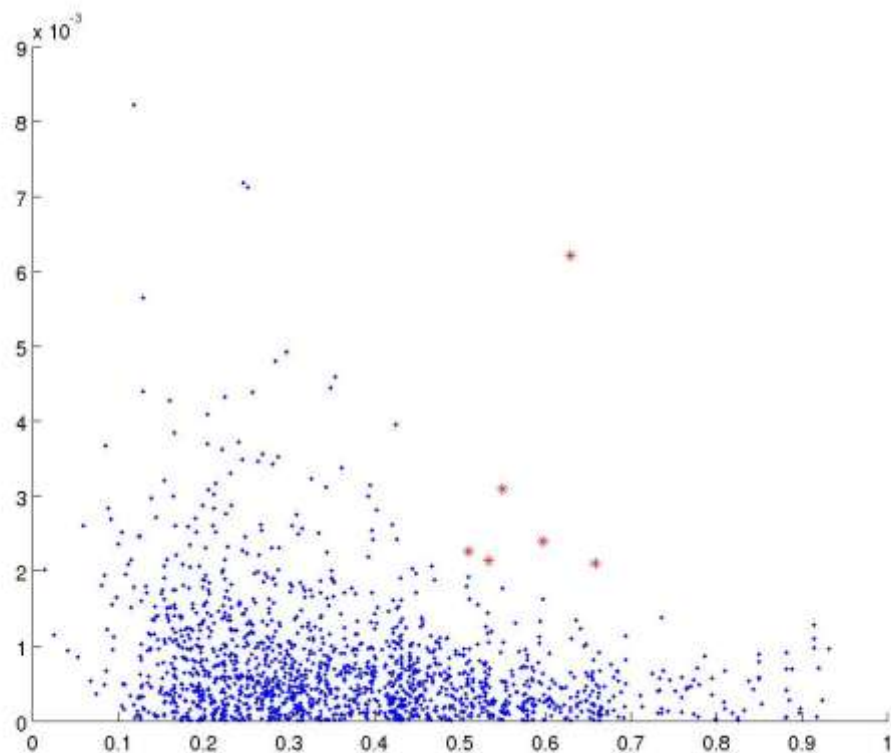


Рисунок 4.51 – Диаграмма критических деформаций

Создание карт деформаций на основе материалов РЛ съемки среднего разрешения ERS-1/2 условно можно разделить на 2 категории:

- создание карт смещений по материалам тандемной съемки;
- построение карт смещений по материалам съемки ERS-1/2 с временным разрывом более суток.

Безусловным является тот факт, что при тандемной съемке мы имеем достаточно большую когерентность по всей обрабатываемой сцене, и, в частности, вдоль береговой линии. Однако при обработке снимков с временным разрывом более суток когерентность в интерферометрических парах в данном наборе распределена неравномерно вдоль береговой линии.

При создании карт деформаций мы не рассматриваем возможность «интенсивного» сглаживания и фильтрации интерферограммы, как следствие, в результате развертка фазы для снимков со значительным временным разрывом прошла в большинстве случаев неудачно.

Построенная по результатам сравнения двух снимков и цифровой модели SRTM карта смещений рельефа показана на рисунке 4.52. Очевидно, что деформации вдоль береговой линии носят незначительный порядок и соответствуют областям со сравнительно высоким значением уровня когерентности (полагалось, что когерентность ниже 0,25 соответствует областям с существенными фазовыми помехами).

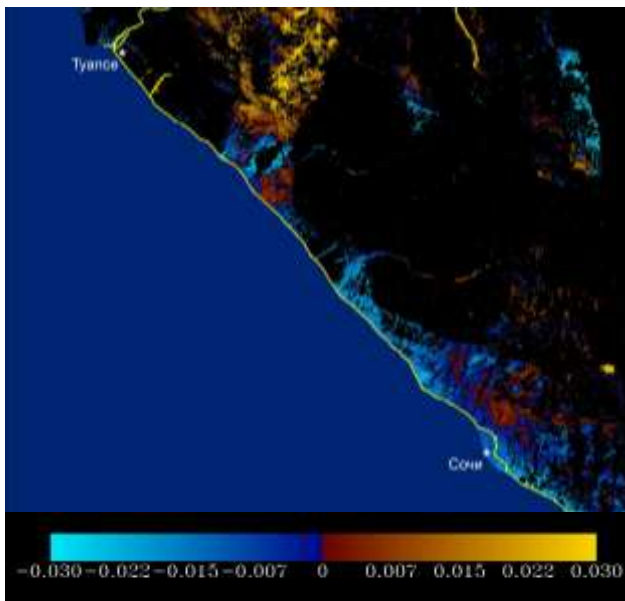


Рисунок 4.52 – Карта смещений

Параметры съемки	
Угол наблюдения к надиру, градусы	23
Базовая линия, метры	339.427
Временной разрыв, дни	1
Параметры обработки	
Пороговая когерентность	0,25
Использование файла точной орбиты	Да

Вдоль линии железнодорожного полотна был построен профиль когерентности фаз. Когерентность вдоль железнодорожного полотна для данной пары нестабильна, что обусловлено временной декорреляцией, включающей в себя как изменение геофизических характеристик отражающей поверхности, так и изменением геометрии отражающих объектов, что существенно для С-диапазона.

В результате первого этапа обработки были получены массивы смещений и когерентностей, представленные на рисунках 4.53 и 4.54.

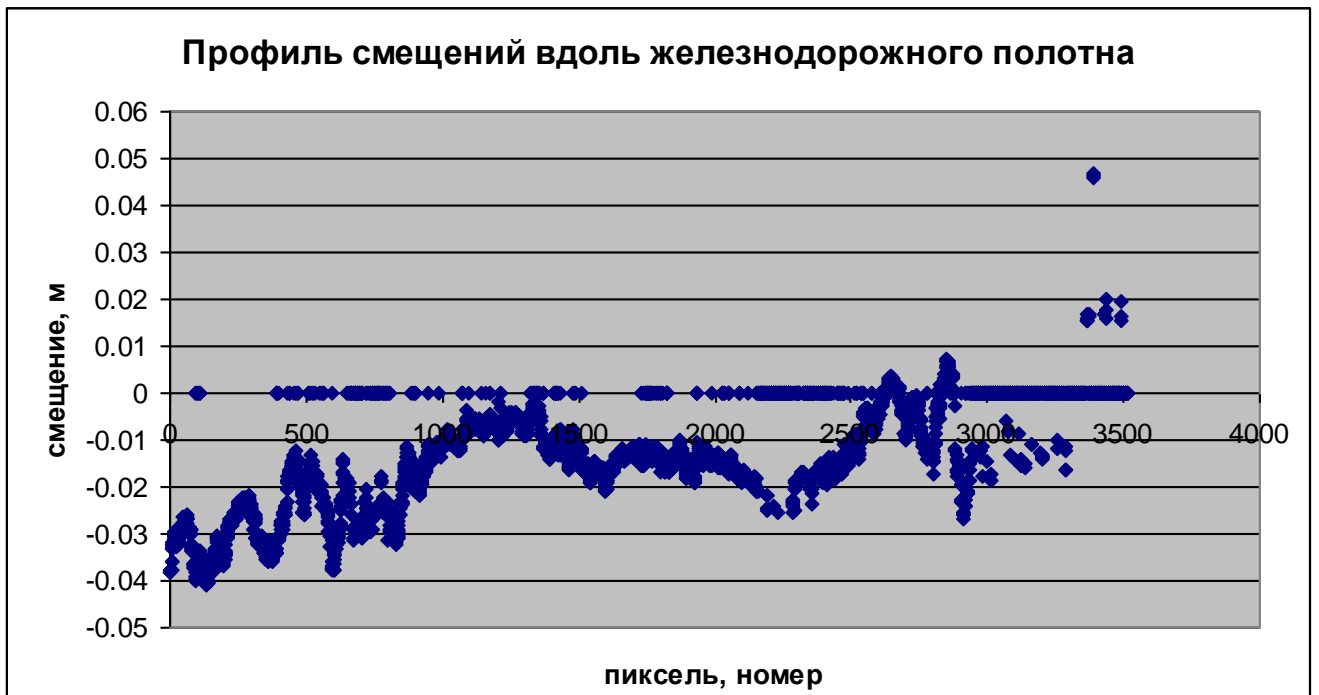


Рисунок 4.53 – Профиль смещений



Рисунок 4.54 – Массив когерентности

По разрабатываемой методике «критических деформаций» был построен массив относительных деформаций вдоль железнодорожного полотна и областей в непосредственной близости от него (рисунок 4.55).



Рисунок 4.55 – Профиль сдвигов

Далее из массива деформаций были отобраны все значения, превышающие критический уровень  $d^*=0,0025$  для которых были проверены соответствующие значения когерентности (таблица 4.18):

Таблица 4.18 – Отобранный массив деформаций

Номер пикселя, $j$	Модуль величины сдвига, м	Значения когерентности $j$				Координаты
		$j-1$	$j$	$j+1$	$j+2$	
68	2.97300E-003	5.86600E-001	5.44630E-001	5.79230E-001	6.42400E-001	43°25'14.07"N, 39°56'45.19"E
1134	6.70700E-003	7.96120E-001	7.55640E-001	7.56870E-001	7.87670E-001	43°38'45.83"N, 39°40'5.75"E
1135	5.40000E-003	7.55640E-001	7.56870E-001	7.87670E-001	7.4386E-001	43°36'56.04"N, 39°43'23.07"E
2860	2.65600E-003	5.78510E-001	5.72750E-001	5.51880E-001	5.3140E-001	43°57'1.49"N, 39°17'6.06"E

Для выписанных выше номеров пикселей величина деформации превышает критический уровень, а значения когерентности в окрестности превышает пороговое значение  $\hat{c}=0.5$ . Таким образом, мы можем с большой достоверностью утверждать о наличии критических деформаций земной поверхности в зонах, соответствующих отобраным пикселям.

Ниже, на рисунке 4.56, приведена диаграмма критических деформаций, построенная в соответствии с разработанной методикой. Критические деформации выделены на ней красным цветом.

Первая точка соответствует пос. Адлер, деформации вероятны за счет воздействия как природных, так и антропогенных факторов.

Вторая и третья точки с максимальным перепадом высот (до 7 мм) соответствуют пос. Дагомыс.

Четвертая располагается между пос. Лазаревское и пос. Сибирский. Величина сдвига – 2,6 мм.

Перечисленные в таблице 4.18 точки отражены на обзорной карте деформаций железнодорожного полотна и областей в непосредственной близости от него.

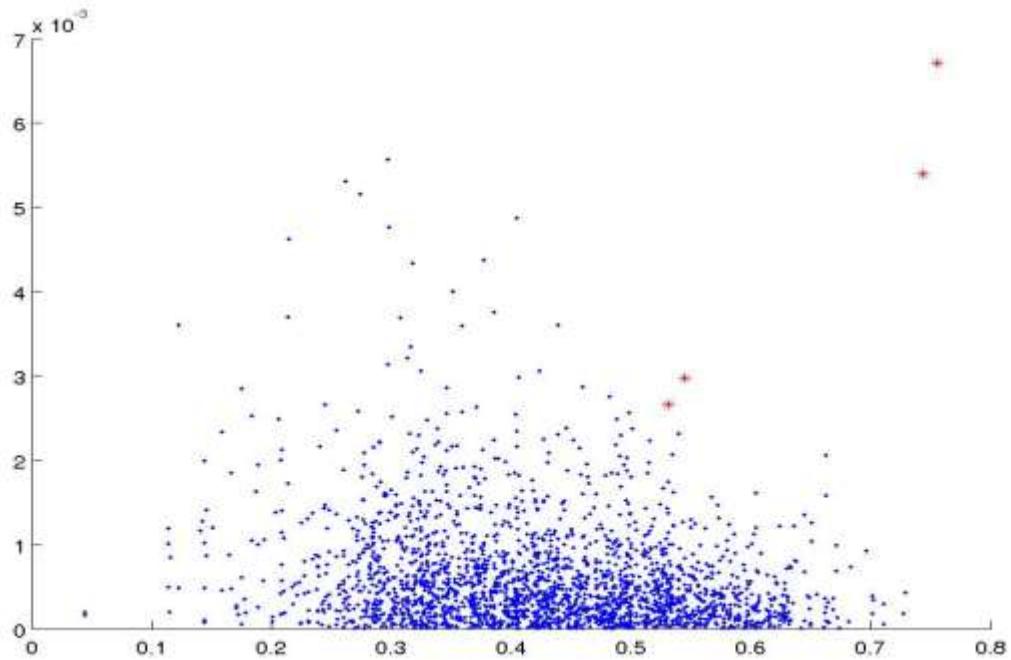


Рисунок 4.56 – Диаграмма критических деформаций

Построенная по результатам сравнения двух снимков и цифровой модели SRTM карта смещений рельефа показана на рисунке 4.57. Очевидно, что деформации вдоль береговой линии носят незначительный порядок и соответствуют областям со сравнительно высоким значением уровня когерентности (полагалось, что когерентность ниже 0,25 соответствует областям с существенными фазовыми помехами).

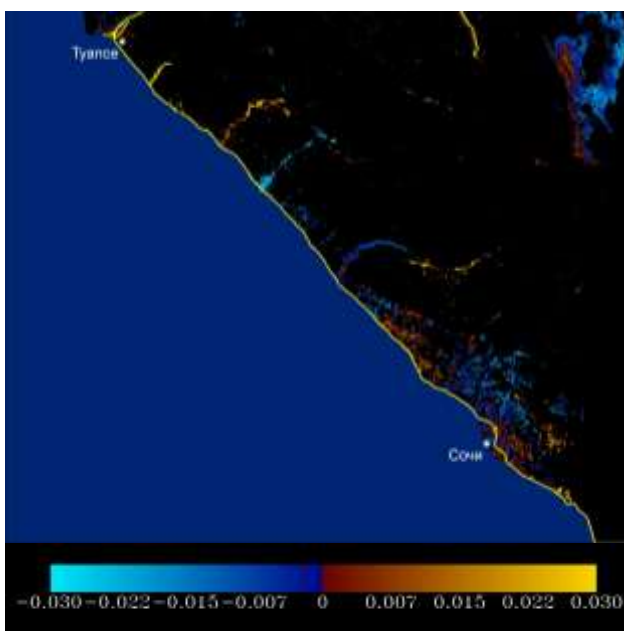


Рис.4.57. Карта смещений

<b>Параметры съемки</b>	
<b>Угол наблюдения к надиру, градусы</b>	<b>23</b>
<b>Базовая линия, метры</b>	<b>63.256</b>
<b>Временной разрыв, дни</b>	<b>1</b>
<b>Параметры обработки</b>	
<b>Пороговая когерентность</b>	<b>0,25</b>
<b>Использование файла точной орбиты</b>	<b>Да</b>

Вдоль линии железнодорожного полотна был построен профиль когерентности фаз. Когерентность вдоль железнодорожного полотна для данной пары нестабильна, что обусловлено временной декорреляцией, включающей в себя как изменение геофизических характеристик отражающей поверхности, так и изменением геометрии отражающих объектов, что существенно для С-диапазона.

В результате первого этапа обработки были получены массивы смещений и когерентностей, представленные на рисунках 4.58 и 4.59.

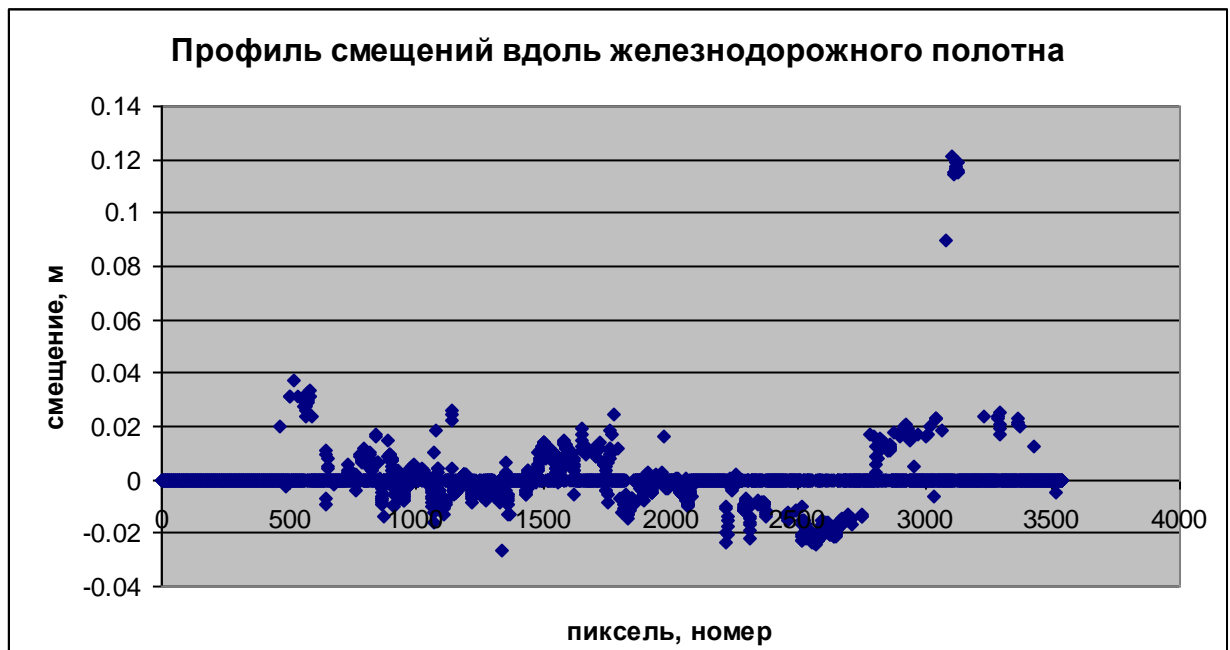


Рисунок 4.58 – Профиль смещений



Рисунок 4.59 – Массив когерентности

По разрабатываемой методике «критических деформаций» [119, 120] был построен массив относительных деформаций вдоль железнодорожного полотна и областей в непосредственной близости от него (рисунок 4.60).

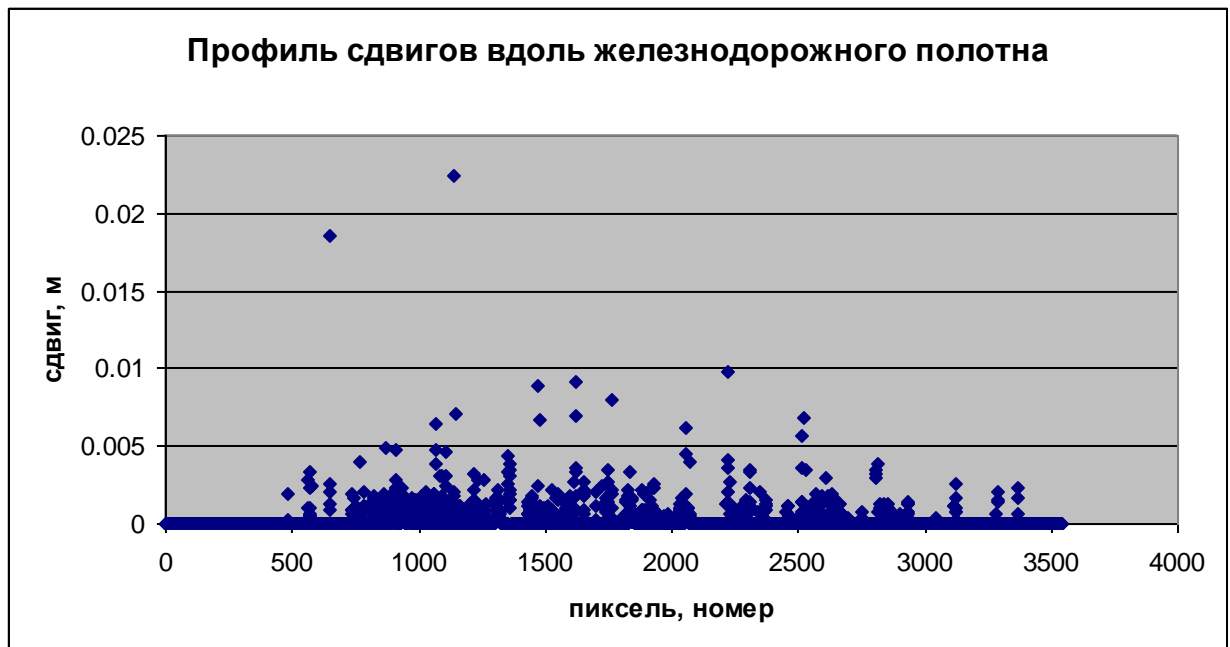


Рисунок 4.60 – Профиль сдвигов



Далее из массива деформаций были отобраны все значения, превышающие критический уровень  $d^* = 0,002$ , для которых были проверены соответствующие значения когерентности (таблица 4.19):

Таблица 4.19 – Выбранный массив деформаций

Номер пикселя, $j$	Модуль величины сдвига, м	Значения когерентности				Координаты
		$j-1$	$j$	$j+1$	$j+2$	
1163	2.23800E-003	5.06910E-001	5.21290E-001	5.82690E-001	6.41090E-001	43°37'48.04"N, 39°41'42.84"E
1799	2.18900E-003	5.02690E-001	5.48440E-001	5.78420E-001	6.39310E+000	43°44'30.70"N, 39°31'53.99"E
1800	3.57900E-003	5.48440E-001	5.78420E-001	6.39310E-001	5.34630E-001	43°44'33.15"N, 39°31'50.65"E

Для выписанных выше номеров пикселей величина деформации превышает критический уровень, а значения когерентности в окрестности превышает пороговое значение  $\hat{c} = 0.5$ . Таким образом, мы можем с большой достоверностью утверждать о наличии критических деформаций земной поверхности в зонах, соответствующих отобраным пикселям.

Ниже, на рисунке 4.61, приведена диаграмма критических деформаций, построенная в соответствии с разработанной методикой. Критические деформации выделены на ней красным цветом.

Первая точка соответствует пос. Мамайка, деформации вероятны за счет воздействия как природных, так и антропогенных факторов, их величина – 2,2 мм.

Вторая и третья точки соответствуют ж.д. пути пос. Лоо – пос. Шахе.

Перечисленные в таблице 16 точки отражены на обзорной карте деформаций железнодорожного полотна и областей в непосредственной близости от него.

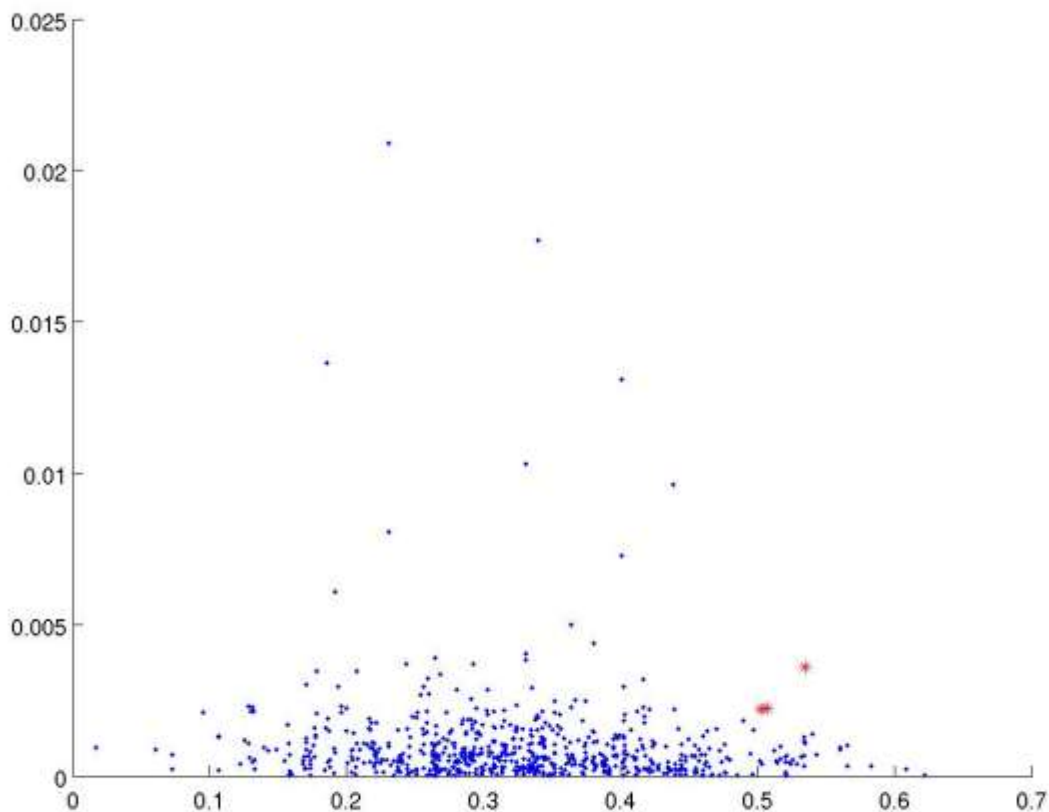


Рисунок 4.61 – Диаграмма критических деформаций

Построение цифровых моделей рельефа/местности по цифровым материалам спутника ALOS (сенсор PALSAR) осуществлялось в пакете SARscape (тестовая версия) по методу 2-х проходной дифференциальной интерферометрии. Входными данными служили 15 отобранных снимков, покрывающих участок железной дороги «Адлер-Туапсе» в период с 2006 по 2007 гг. Полный перечень входных данных приведен в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Список заказанных сцен ALOS PALSAR

<b>Номер снимка</b>	<b>Дата съемки</b>	<b>Время съемки (по центру сцены)</b>	<b>Орбита</b>
<i>Группа 1</i>			
1	2006/12/24	19:44:23.628	A
4	2007/02/08	19:44:38.483	A
9	2007/12/27	19:43:42.813	A
13	2008/02/11	19:43:10.083	A
<i>Группа 2</i>			
2	2006/12/24	19:44:31.842	A
5	2007/02/08	19:44:46.697	A
10	2007/12/27	19:43:51.026	A
14	2008/02/11	19:43:18.296	A
<i>Группа 3</i>			
3	2007/01/10	19:46:50.389	A
6	2007/02/25	19:46:59.514	A
11	2008/01/13	19:45:48.018	A
15	2008/02/28	19:45:13.152	A
<i>Группа 4</i>			
7	2007/10/25	19:41:14.164	A
8	2007/12/10	19:41:42.329	A
12	2008/01/25	19:41:14.164	A

Таблица 4.21 – Результаты обработки заказанных снимков ALOS PALSAR

Группы	Пара (№ Снимков)	Опорный	Вспомогательный	Перпендикулярная составляющая базовой линии, м	Разница доплеровских частот	Средняя когерентность по сцене	Примечания
1	1-4	2006/12/24	2007/02/08	1829.509	-96.769	0.174	
1	4-9	2007/02/08	2007/12/27	2628.065	118.659	0.0967	Временная декорреляция
1	9-13	2007/12/27	2008/02/11	1358.318	-58.698	0.2289	
2	2-5	2006/12/24	2007/02/08	1101.372	-19.339	0.2032	
2	5-10	2007/02/08	2007/12/27	1778.627	26.919	0.1702	Временная декорреляция
2	10-14	2007/12/27	2008/02/11	1006.899	2.822	0.1471	
3	3-6	2007/01/10	2007/02/25	2400.392	105.063	0.1615	
3	6-11	2007/02/25	2008/01/13	2045.750 (29.467)	-26.715	0.1709	
3	11-15	2008/01/13	2008/02/28	665.358 (90.587)	-13.905	0.2392	Лучшая пара
4	7-8	2007/10/25	2007/12/10	876.174 (64.140)	51.796	0.1756	Ошибка орбитальных параметров
4	8-12	2007/12/10	2008/01/25	666.959 (84.348)	-30.170	0.1916	

Районы интереса (и обработки) представляют собой вырезанные фрагменты сцены вдоль береговой линии Черного моря (2 фрагмента на одну сцену). В среднем, ширина анализируемой полосы составляет 10 километров.

На рисунке 4.62 приведено изображение региона интереса (участок черноморского побережья Туапсе-Адлер) с наложенным векторным слоем изображений ALOS PALSAR и вырезанными фрагментами сцен (зеленые прямоугольники). Желтой линией показана железная дорога Туапсе-Адлер, полученная по топографическим картам масштаба 1: 200 000.

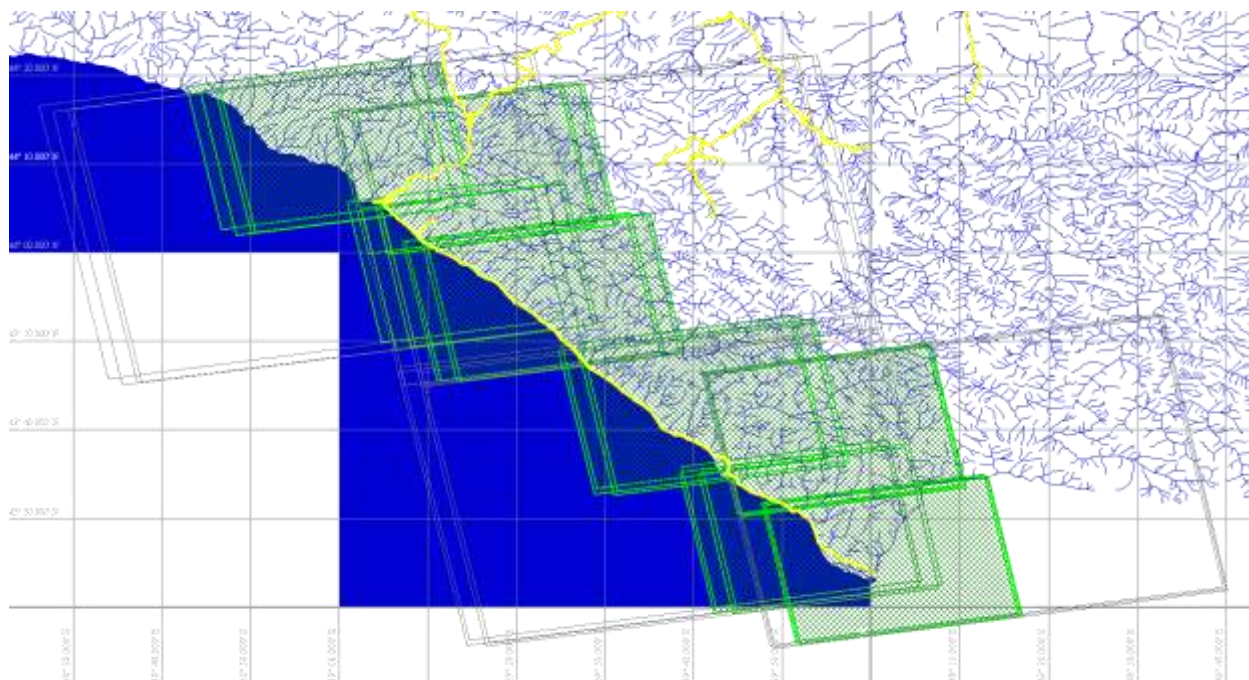


Рисунок 4.62 – Фрагменты сцены вдоль береговой линии Черного моря

Вследствие того, что район исследования обладает достаточно сложным рельефом, величина когерентности вдоль береговой линии, в районе расположения железнодорожных путей, существенно превышает среднее значение по фрагменту, указанное в таблице 4.22.

Оценка точности построения цифровых моделей местности проводилась путем сравнения с существующей моделью SRTM, при этом полученные по результату интерферометрической обработки ЦММ приводились к разрешению 90 метров в плане (размер ячейки). Оценка среднеквадратического отклонения проводилась путем анализа всего массива данных полученной ЦММ, за исключением пикселей, приходящихся на объекты гидрографической сети.

Таблица 4.22 – Параметры цифровой модели местности по паре снимков от 2006.12.24/2007.02.08

Параметр	Значение
Окно усреднения интерферограммы	7*7
Сигнал/шум	0,25
Отсечение по когерентности	0,25
Окно интерполяции ЦММ	7*7
Размер окна когерентности	7*7
Средняя величина когерентности вдоль береговой линии	0,5

На рисунке 4.63 приведена карта когерентности на анализируемый фрагмент изображения, полученная путем совместного анализа снимков интерферометрической пары. Размер окна, которым производился подсчет когерентности – 7 пикселей.

По полю интерферограммы наблюдаются фазовые шумы, что сделало необходимым осуществить фильтрацию фазового шума окном 7\*7. Как видно из рисунка 4.64, хорошая интерферометрическая картина (размер окна адаптивного фильтра – 7 пикселей) наблюдается практически по всей территории близ береговой линии.

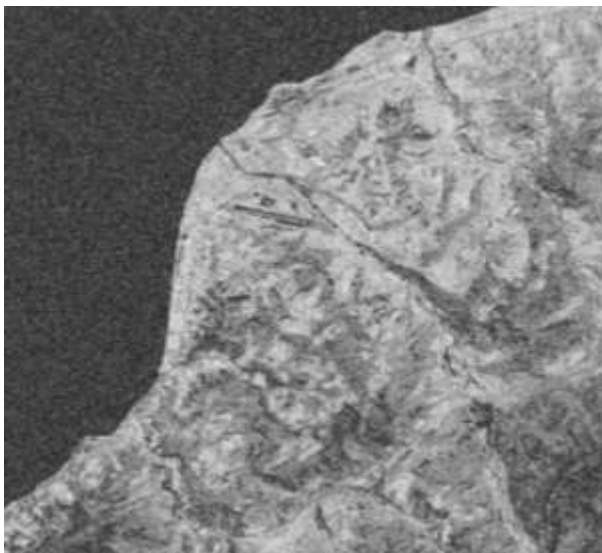


Рисунок 4.63 – Фрагмент карты когерентности

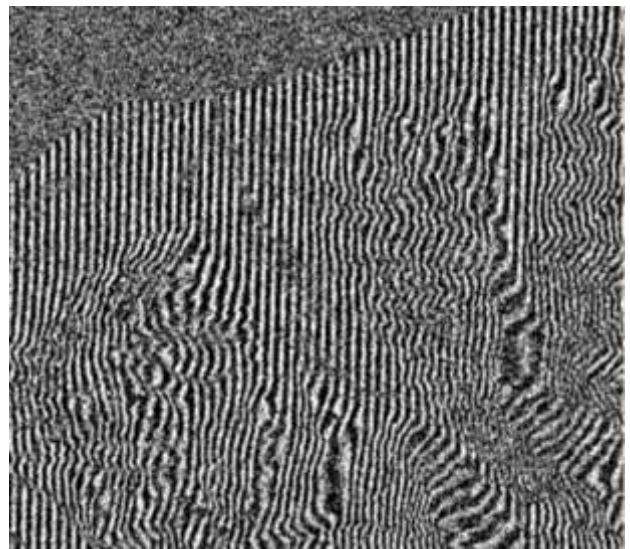


Рисунок 4.64 – Фрагмент интерферограммы

На рисунке 4.65 приведена цифровая модель местности, полученная по данным радарной съемки спутником ALOS (сенсор PALAR) 2006.12.24/2007.02.08 с размером ячейки 10 метров. Красной линией обозначена железная дорога Туапсе-Адлер, полученная по топографической карте масштаба 1:200 000.

Значение перпендикулярной составляющей базовой линии (1829.509 м) оптимально для создания ЦММ по РЛ данным, полученным в L-диапазоне.

Для оценки ошибки построения ЦММ была использована ЦМР SRTM как опорная. Обе цифровые модели были приведены к единому пространственному разрешению (размеру ячейки), затем было произведено вычитание полученной ЦМР из SRTM. На рисунке 4.66 показана карта ошибок интерферометрической ЦММ.

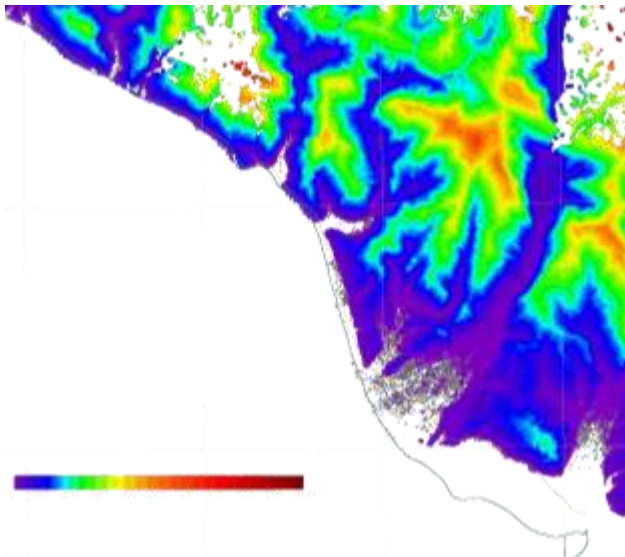


Рисунок 4.65 – Фрагмент ЦММ в псевдоцвете

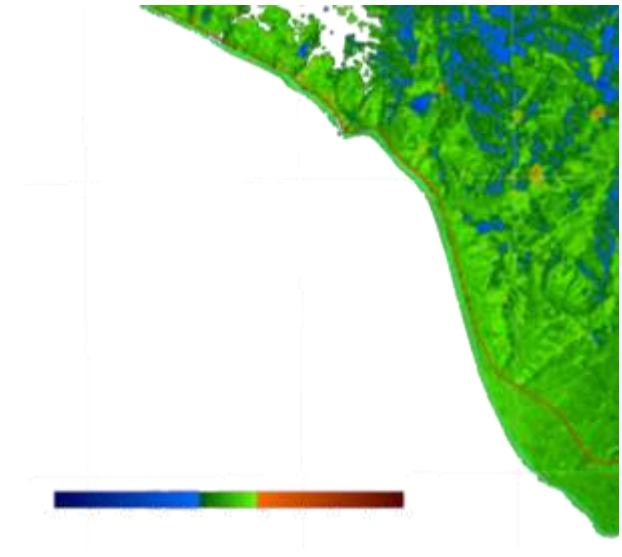
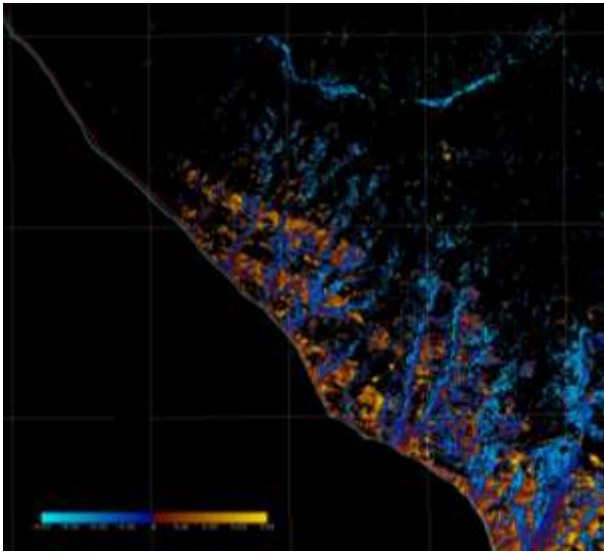


Рисунок 4.66 – Карта ошибок полученной ЦММ

Распределение ошибки можно описать следующим образом: в высокогорных районах разность опорной ЦМР и ЦММ, полученной интерферометрическим методом, максимальна, что объяснимо с точки зрения основ радарной съемки: сказываются эффекты радарных теней и переналожения [119,120].

Была произведена оценка среднеквадратического отклонения полученной ЦММ. СКО составило 16,5 метров (опорой служила ЦММ SRTM).

Построенная по результатам сравнения двух снимков и цифровой модели SRTM карта смещений рельефа приведена на рисунке 4.67. Очевидно, что деформации вдоль береговой линии носят незначительный порядок и соответствуют областям со сравнительно высоким значением уровня когерентности (полагалось, что когерентность ниже 0,25 соответствует областям с существенными фазовыми помехами).



Параметры съемки	
Угол наблюдения к надиру, градусы	45
Базовая линия, метры	1829.5
Временной разрыв, дни	46
Параметры обработки	
Пороговая когерентность	0,25
Использование файла точной орбиты	Да

Рисунок 4.67 – Участок карты смещений

Вдоль линии железнодорожного полотна был построен профиль когерентности фаз [120]. Когерентность вдоль железнодорожного полотна для данной пары нестабильна, что обусловлено временной декорреляцией, включающей в себя изменение геофизических характеристик отражающей поверхности (что характерно для L-диапазона).

В результате первого этапа обработки были получены приведенные на рисунках 4.68 и 4.69 массивы смещений и когерентностей.



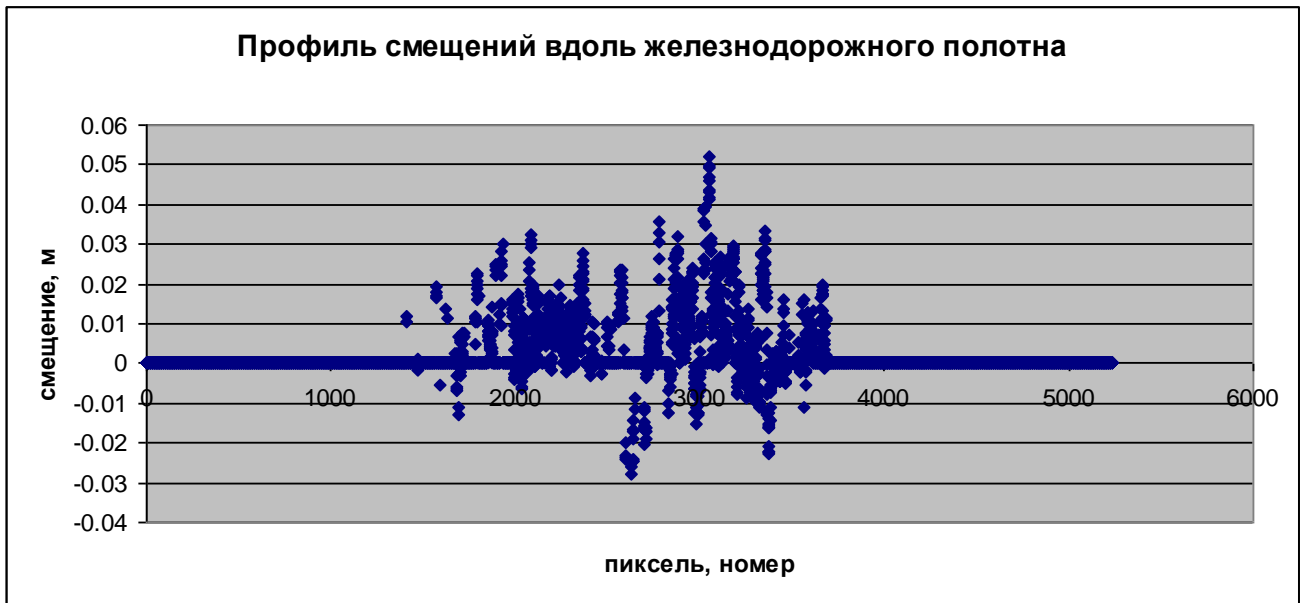


Рисунок 4.68 – Профиль смещений вдоль железнодорожного полотна

Построенный по карте деформаций профиль смещений показывает незначительные деформации поверхности – смещения вдоль линии наблюдения со спутника в диапазоне  $[-2.7; 5]$  см.

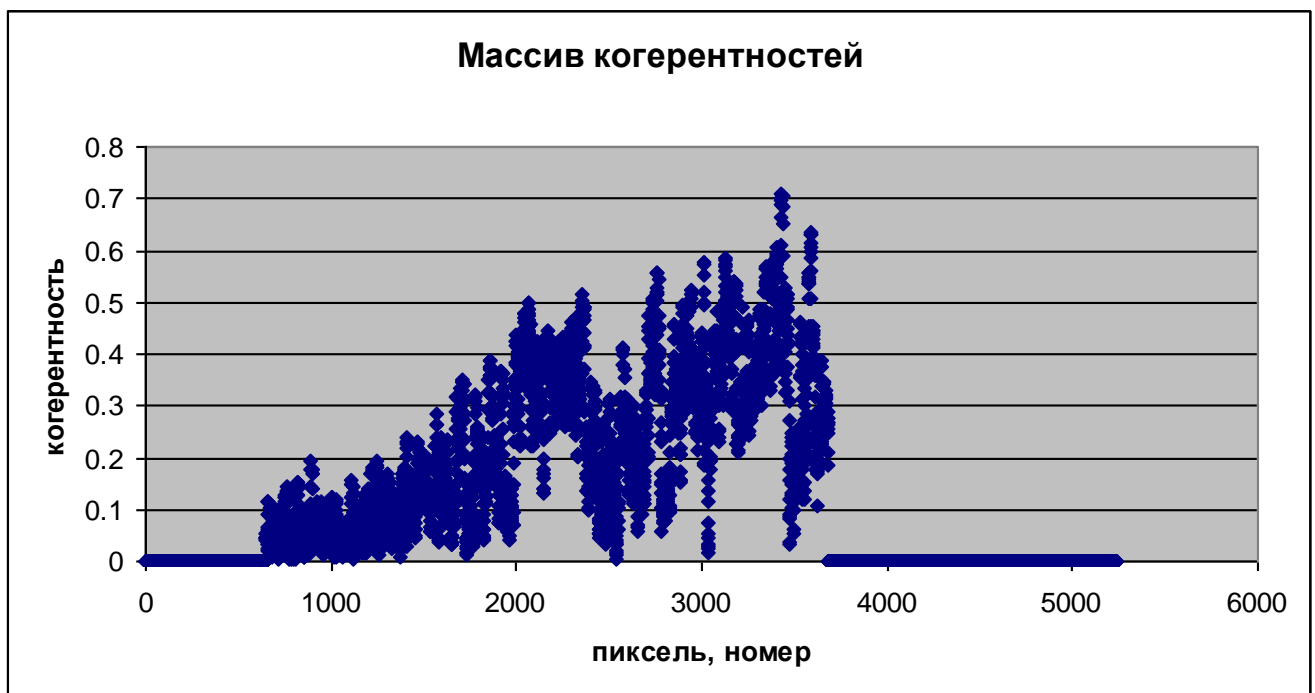


Рисунок 4.69 – Массив когерентности

По разрабатываемой методике «критических деформаций» был построен массив относительных деформаций вдоль и в непосредственной близости от железнодорожного полотна (рисунок 4.70).



Рисунок 4.70 – Массив относительных сдвигов

С помощью кривой селекции ( $d^*=0,002$ ,  $\hat{c}=0.6$ ) было проверено наличие точек критических деформаций. Для данного фрагмента сцены точки критических деформаций отсутствуют (рисунок 4.71).

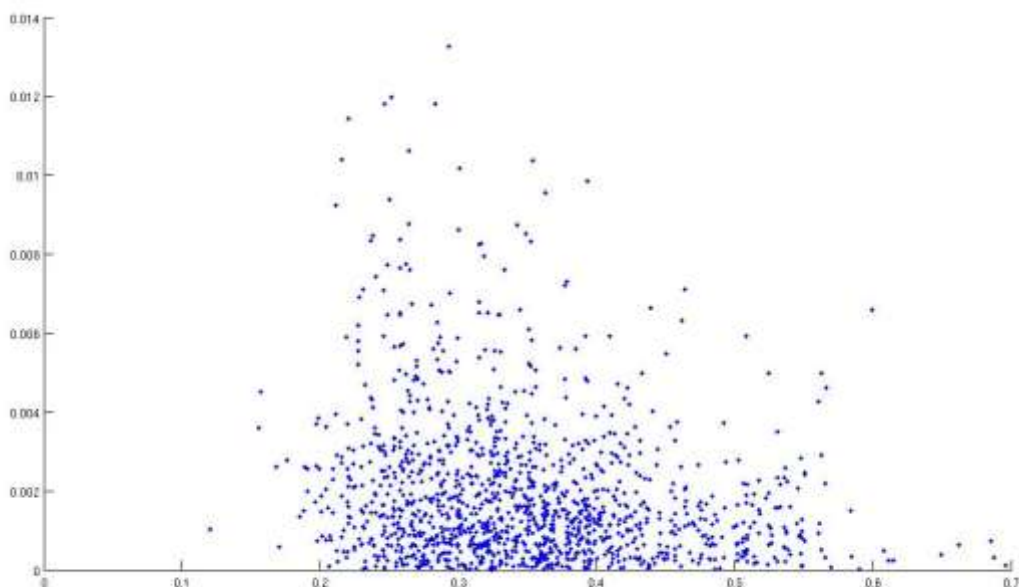


Рисунок 4.71 – Диаграмма критических деформаций

На рисунке 4.72 представлена обзорная схема опасных участков ж.д. Туапсе-Адлер.

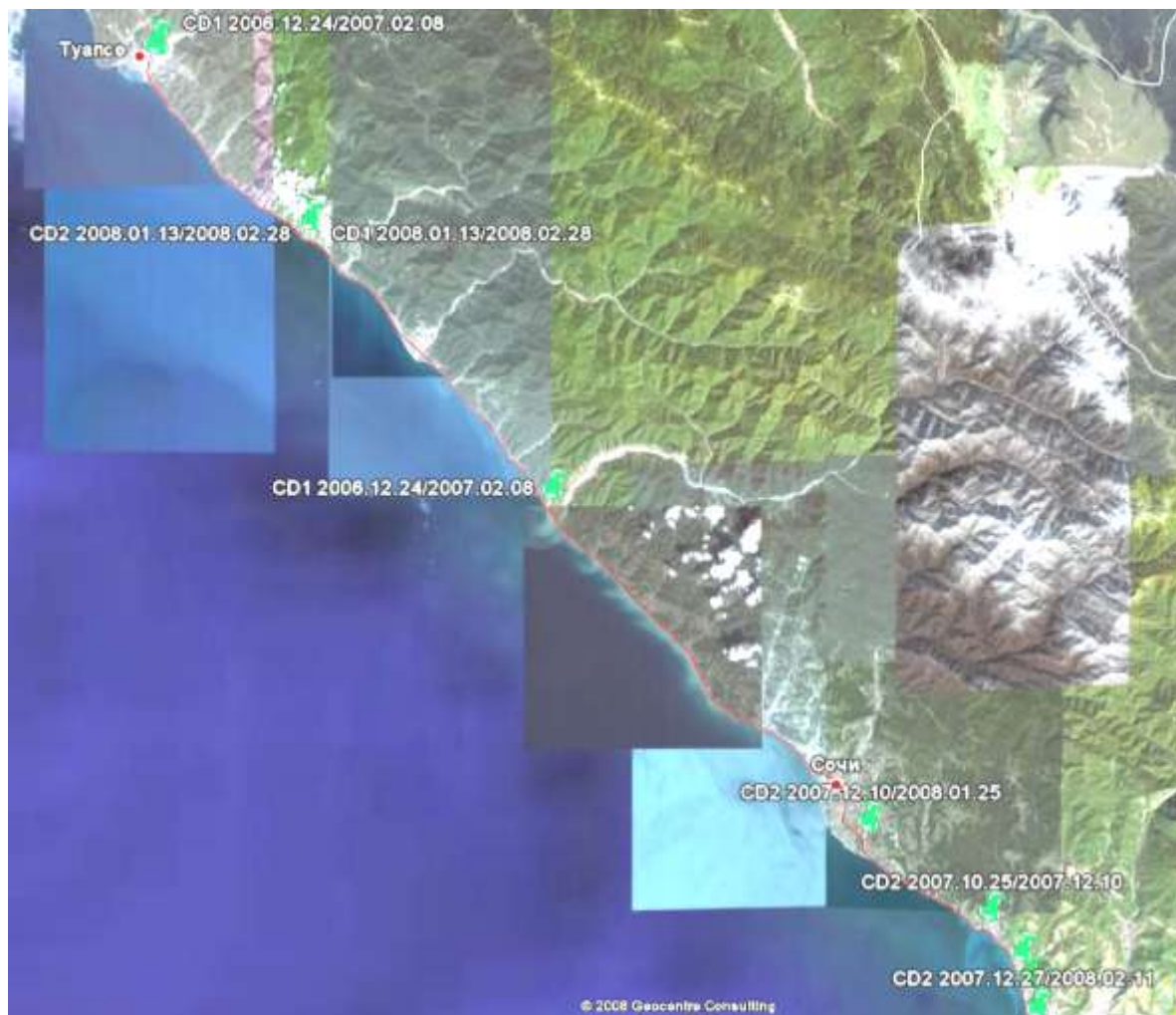


Рисунок 4.72 - ГИС Google Earth с наложенными точками опасных участков железнодорожного пути на линии Туапсе-Адлер (по данным интерферометрической обработки)

Рассмотрев и проанализировав методы радиолокационной космической интерферометрии для решения задачи мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути и их место среди других методов мониторинга [120]. Путем сравнения существующих в мире систем радиолокационного дистанционного зондирования Земли и полученных результатов исследований, как российских, так и зарубежных ученых доказано, что методы космического радиолокационного зондирования позволяют на ранней стадии и с высокой точностью выявлять сме-

щения земной поверхности [65, 66], предоставляя тем самым возможность выработки мер по предупреждению аварийных ситуаций.

В таблице 4.23 на основе проведенных исследований приведена разработанная классификация методов мониторинга чрезвычайных ситуаций по уровню отслеживаемой опасности для объектов путевого комплекса на примере оползневых процессов.

Таблица. 4.23.

Космические методы мониторинга чрезвычайных ситуаций	Медленно зарождающиеся оползневые процессы (Класс 1-2)*	Оползневые процессы средней скорости движения (Класс 3)*	Внезапные быстро движущиеся оползневые процессы (Класс 4-7)*
Спутниковая телевизионная съемка	<b>Эффективно</b> (ежегодная съемка)	Неэффективно	Неэффективно
Спутниковая радиолокационная съемка	<b>Эффективно</b> (ежегодная съемка)	<b>Эффективно</b> (ежемесячная съемка)	<b>Эффективно</b> (при использовании угловых отражателей)
Наземный мониторинг скорости смещения с помощью аппаратуры ГЛОНАСС/GPS	Неэффективно	<b>Эффективно</b> (целесообразны периодические ежемесячные измерения контрольных точек)	<b>Эффективно</b> (постоянные непрерывные измерения в контрольных точках)

(\* согласно классификации приведенной в Инструкции по применению методов дистанционного мониторинга и предупреждения опасных природных воздействий на инфраструктуру железных дорог скорости деформации в сутки (мм) составляют: 1-2 класс –  $0,05 \div 0,1$ ; 3 класс –  $0,5$ ; 4-7 класс -  $2 \div 2400$ )

Можно сделать вывод, что метод дифференциальной радиолокационной интерферометрии представляет собой эффективное средство определения подвижек земной поверхности и деформаций сооружений. Принципиальное преимущество дифференциальной радиолокационной интерферометрии перед другими методами мониторинга вертикальных и плановых деформаций заключается в возможности прямой фиксации объемных деформаций железнодорожного пути и путевой инфраструктуры (мостов, тоннелей, эстакад, насыпей и др.), произошедших между съемками, с миллиметровыми точностями [119, 120].

Технологическая схема и информационная модель сбора, передачи и обработки спутниковой информации были приняты к реализации для задач мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути и внедрены на участке Адлер-Туапсе Северокавказской железной дороги в рамках выполнения работы плана НТР ОАО «РЖД» №19.5.011.Н «Разработка спутниковой технологии мониторинга потенциально-опасных участков ж.д. пути (оползни, скально-обвальные участки и т.д.) в рамках реализации международного научно-технического сотрудничества между ОАО «РЖД» и корпорацией «Финмекканика (Телеспацио)». Получен патент Российской Федерации на полезную модель № 2009115803/22 от 27.04.2009 «Система контроля потенциально-опасных участков железнодорожного пути с использованием данных дистанционного зондирования Земли».

## **5 Комплексная система мониторинга и предотвращения чрезвычайных ситуаций на полигоне Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги с применением средств глобального космического наблюдения**

В рамках работ по созданию и вводу в эксплуатацию опытного образца системы и технологии мониторинга железных дорог на основе спутниковых технологий и геоинформационной базы данных (ГБД) по опасным природно-техногенным участкам на полигоне Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги были выполнены следующие работы [66, 67, 68]:

- проведен анализ существующих методов радиолокационной интерферометрии для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) и определения смещений поверхности, проведен сравнительный анализ программного обеспечения для интерферометрической обработки радиолокационных данных;

- произведен отбор и подготовка радиолокационных снимков из архивов данных космических аппаратов ERS1/2, ENVISAT и ALOS на участок Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги;

- разработана методика и технология оценки смещения земной поверхности по радиолокационным снимкам среднего разрешения;

- разработана методика дешифрирования потенциально-опасных участков местности по данным космической оптической съёмки высокого разрешения;

- проведена апробация технологии оценки смещений земной поверхности на РЛ снимках среднего разрешения из архивов КА ERS1/2, ENVISAT и ALOS;

- создана технология оценки риска опасного воздействия неблагоприятных природно-техногенных факторов на железнодорожную инфраструктуру на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли;

- создана специализированная геоинформационная система с интегрированной базой данных, аккумулирующей результаты обработки данных ДЗЗ;

- разработано клиентское WEB-приложение для отображения результатов анализа подвижек земной поверхности;

- разработана технологическая схема мониторинга по оптическим и РЛ данным среднего разрешения (рисунок 5.1), позволяющая с высокой точностью строить цифровые карты склонов, определять критические точки деформаций земной поверхности, по результатам анализа оптических снимков строить карту потенциально-опасных воздействий.

На основе совместного анализа этих данных в специализированной ГИС создается карта риска неблагоприятных воздействий на железнодорожную инфраструктуру с выдачей рекомендаций по проведению ремонтных работ и указаний по ограничению движения на опасном участке [217].

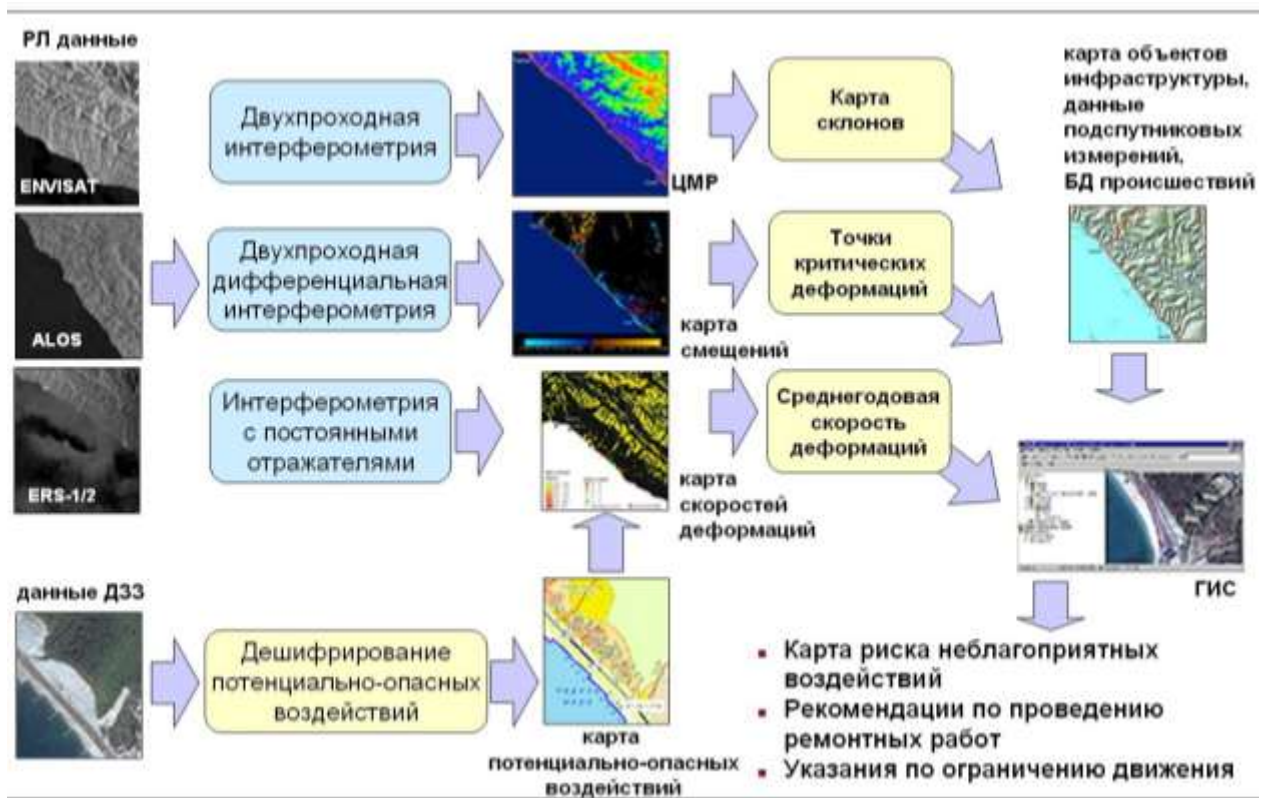


Рисунок 5.1 – Технологическая схема мониторинга по оптическим и РЛ данным среднего разрешения

Схема мониторинга предусматривает ряд технологических этапов, необходимых для получения информационной продукции, предназначенной для интеграции в специализированную ГИС [19, 20, 21, 22, 23, 24].

Для получения данных ДЗЗ необходимо произвести предварительный заказ съемки интересующей территории или произвести отбор данных из архива с помощью специализированного Internet ресурса Европейского космического агентства (ЕКА).

При помощи технологии двухпроходной интерферометрии строится ЦМР. Построенные в рамках работы ЦМР по точности превосходят свободно распространяемые модели SRTM и GTOPO30. Модели рельефа необходимы для определения подвижек земной поверхности с помощью двухпроходной дифференциальной интерферометрической обработки.

С целью определения критической крутизны косогоров, из ЦМР путем пространственного дифференцирования получают карты склонов.

Обработка оптических снимков и их дешифрирование позволяет создавать карты потенциально-опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру.

На основе ЦМР и пары радиолокационных снимков путем дифференциальной интерферометрии строится карта смещений земной поверхности на исследуемом участке.

В результате анализа ряда РЛ снимков, полученных в течение года и дешифрирования оптических снимков участка, были детектированы естественные отражатели радиолокационного излучения, способствующие более точному дешифрированию подвижек грунта [217] и позволяющие определять среднегодовую скорость деформаций (рисунок 5.2).



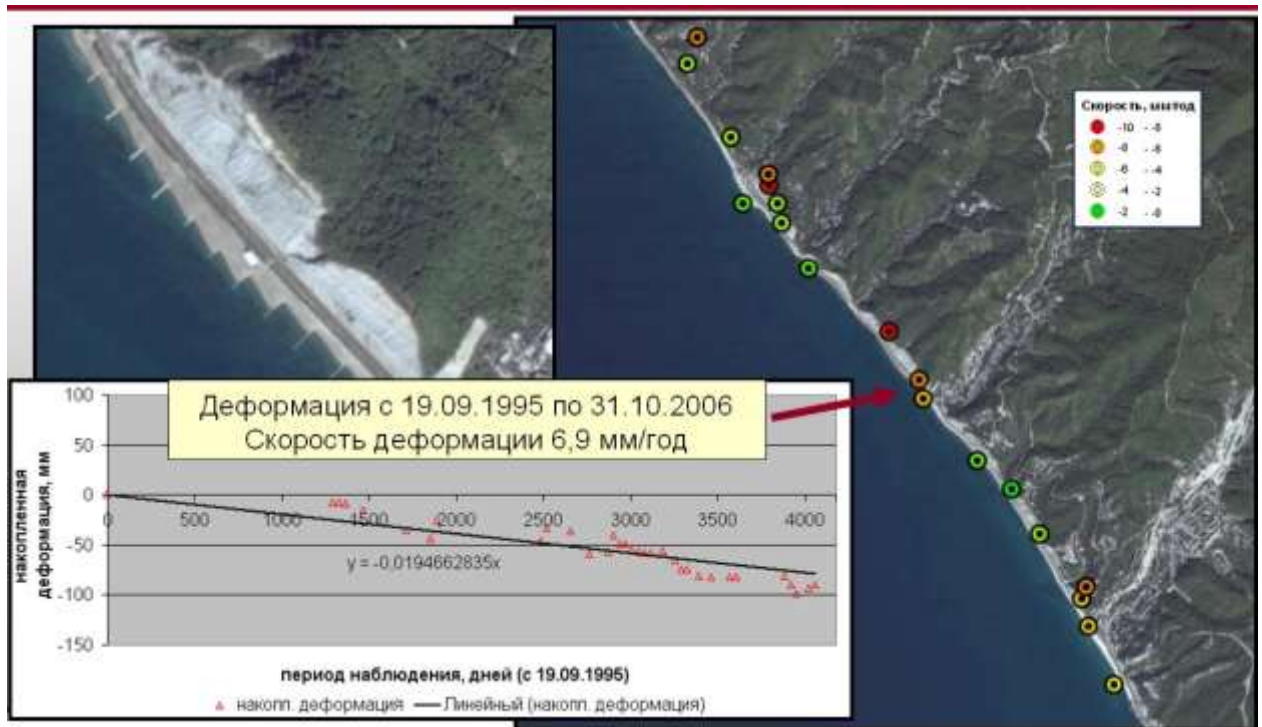


Рисунок 5.2 – Определение скорости деформаций

Была разработана методика определения смещения по результатам обработки данных ДЗЗ, позволяющая определять величину и скорость смещений (рисунок 5.3).

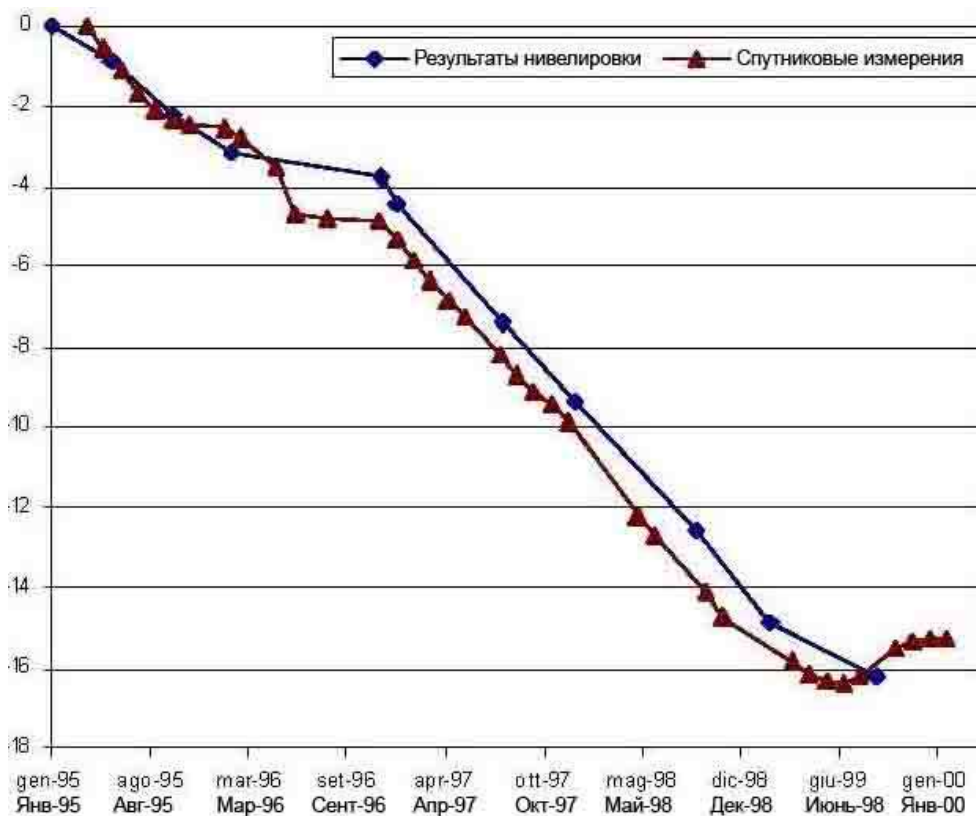


Рисунок – 5.3

Анализ полученных результатов позволяет определить критические точки смещений, находящиеся в непосредственной близости от железнодорожного полотна.

Для дальнейшего анализа и построения карты риска воздействия природно-техногенных факторов все полученные данные, включая результаты обработки данных ДЗЗ [47], метеорологической и сейсмической обстановки, цифровые карты железнодорожной инфраструктуры, данные от железнодорожных служб о событиях на дороге, интегрируются в специализированную ГИС.

ГИС позволяет осуществлять совместный анализ данных с привязкой к железнодорожной инфраструктуре, создавать карты риска неблагоприятных воздействий с выдачей рекомендаций по проведению ремонтных работ и указаний по ограничению движения

Геоинформационная система, WEB-GIS обеспечивает возможность работы с геоинформационной базой данных мониторинга потенциально-опасных участков железной дороги через сеть Intranet/Internet.

На опытный полигон Туапсе-Адлер СКЖД установлен программно-аппаратный комплекс, состоящий из двух автоматизированных рабочих мест для комплексной обработки радиолокационных данных с помощью специализированного радарграмметрического ПО (PHOTOMOD и PHOTOMOD RADAR) и анализа полученных данных в ГИС ObjectLand.

По результатам оценки рисков возникновения скально-обвальных косоголов, сужения защитной береговой полосы, оползневых явлений, создающих реальную угрозу безопасности движения поездов отделом сооружений в составе службы пути дороги принимается решение о выезде на опасное место вагона инженерно-геологического обследования дороги (ВИГО) для проверки достоверности полученных данных, путём соответствующих измерений, в частности путём бурения и заборов проб грунта и замеров давления скальных пород.

На этапе отработки пилотного проекта на участке Туапсе-Адлер по результатам сопоставления обработанных данных спутникового мониторинга и наземного обследования службой пути и руководством дороги принимается решение о неот-

ложных необходимых объемах работ по ремонту, усилению и реконструкции сооружений на неустойчивых местах земляного полотна железнодорожной линии (укрепление земляного полотна с морской стороны, капитальный ремонт и новое строительство морских волноотбойных стен, строительство противооползневых подпорных стен, закрепление скально-обвальных косогоров, регуляция речных русел).

Предложенная система мониторинга позволяет охватывать измерениями весь опытный полигон в единой глобальной системе координат [218, 219], оперативно отслеживать изменения состояния пути и прилегающих территорий, выявлять объемные деформации, имеющие протяженный характер и фактически меняющие геометрию пути всего участка [217].

Основные технологические этапы мониторинга протяженных потенциально-опасных участков железнодорожного пути на основе использования материалов аэрокосмической съемки приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Карта технологической информации

<b>Основные процессы</b>	<b>Перечень технологических операции</b>	<b>Получаемая технологическая информация</b>
Заказ и получение данных космических съёмок (радиолокационных и оптических)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– планирование периодичности получения необработанных изображений высокого разрешения со спутников ERS-1/2,ENVISAT, Radarsat на участок железнодорожного пути [94,97];</li> <li>– приобретение снимков.</li> </ul>	Оперативное поступление снимков участка пути
Цифровая подготовка снимков	<ul style="list-style-type: none"> <li>– радиометрическая коррекция цифровых снимков;</li> <li>– геометрическая коррекция цифровых снимков [95,96];</li> </ul>	Яркостно и геометрически улучшенные снимки,

<b>Основные процессы</b>	<b>Перечень технологических операции</b>	<b>Получаемая технологическая информация</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– изменение яркости и контрастности всего изображения или отдельных его участков[96];</li> <li>– фильтрация значений яркости (сглаживания) и выделенных контуров с целью отбора элементов изображения [96];</li> <li>– цветное синтезирование и цветовое кодирование [28, 29, 30, 124];</li> <li>– координатная привязку цифрового изображения;</li> <li>– выбор наиболее оптимального способа трансформирования;</li> <li>– выбор контрольных точек (наземных или с эталонного снимка) [122, 123, 124];</li> <li>– расчет ошибок и оценка результатов трансформирования;</li> <li>– переопределение значений пикселей и создание выходного файла изображения с новой информацией о координатах в заголовке файла [125];</li> <li>– ортотрансформирование снимков [29];</li> <li>– создание мозаик снимков.</li> </ul>	<p>подготовленные к идентификации изобразившихся областей и объектов, определения их местоположения и для извлечения информации об их изобразительных свойствах и признаках.</p>

<b>Основные процессы</b>	<b>Перечень технологических операции</b>	<b>Получаемая технологическая информация</b>
<p>Детектирование проявлений потенциально-опасных процессов</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– определение классов потенциально-опасных объектов и участков;</li> <li>– определение их временного интервала (сезон, год и т.п.);</li> <li>– создание композиций разновременных снимков за два срока и выделение изменившихся и неизменившихся кластеров пикселей;</li> <li>– использование алгебры изображений — вычитание, синтез или вычисление отношений соответствующих зон;</li> <li>– сопоставление результатов классификации разновременных снимков, применение бинарных масок — специально создаваемых изображений, содержащих только 0 и 1, которые используют для маскирования неизменившихся или не интересующих дешифровщика объектов, что позволяет выделить изменения;</li> <li>– выявление характерных дешифровочных признаков негативных изменений инфраструктуры железнодорожного транспорта и</li> </ul>	<p>Обнаруженные, распознанные и истолкованные потенциально-опасные объекты и участки железнодорожной инфраструктуры.</p>

<b>Основные процессы</b>	<b>Перечень технологических операции</b>	<b>Получаемая технологическая информация</b>
	<p>прилегающих территорий;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– ручное цифрование классов изменений по экрану — выделение контуров площадных объектов на разновременных снимках высокого разрешения.</li> </ul>	
Создание базы пространственных данных	<ul style="list-style-type: none"> <li>– оценка состояния полосы отвода и охранных зон железнодорожного транспорта;</li> <li>– сбор и систематизация сведений о состоянии полосы отвода, охранных зон, объектов железнодорожного транспорта и представление их заинтересованным лицам для разработки конкретных мер по повышению надежности транспортных перевозок и т.д.);</li> <li>– оценка состояния земляного полотна, верхнего строения пути, водоотводных и дренажных осушительных сооружений, мостовых переходов, пересечений с автомобильными дорогами и другими транспортными коммуникациями (нефте- и газопроводами), линий связи и электропередачи;</li> </ul>	<p>Систематизированные сведения о состоянии железнодорожного пути, полосы отвода, охранных зон, объектов железнодорожного транспорта. Данные об обнаруженных негативных влияниях и повреждениях.</p>

<b>Основные процессы</b>	<b>Перечень технологических операции</b>	<b>Получаемая технологическая информация</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выявление негативных влияний со стороны близко расположенных транспортных коммуникаций (нефте- и газопроводов, водоводов), линий ЛЭП, авто- и железных дорог, линий связи и других сооружений, неподведомственных предприятиям ОАО "РЖД", мест пересечения указанных сооружений с железнодорожными путями;</li> <li>– регистрация всех нарушений и повреждений на сооружениях железнодорожного транспорта;</li> <li>– оценка аварийных ситуаций, произошедших в инфраструктуре и их влияний окружающую среду.</li> </ul>	
Создание цифровой карты риска	<ul style="list-style-type: none"> <li>– представление заданного участка местности в определенном масштабе, проекции, системе координат, как совокупность описаний метрических (пространственных) и семантических (атрибутивных) свойств реальных (мост, железная дорога и т.д.) и условных (подвижки почвогрунтов и т.п.) объектов местности;</li> </ul>	Информативная и оперативная цифровая карта участка железной дороги

<b>Основные процессы</b>	<b>Перечень технологических операции</b>	<b>Получаемая технологическая информация</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– логическое объединение представленных данных в иерархическую структуру по слоям, характеру локализации и признакам;</li> <li>– определение видов объектов карты, семантических характеристик, слоев, в которые объединяются объекты;</li> <li>– описание условных знаков, используемых при формировании цифровой карты на графических устройствах, в цифровом классификаторе (файле ресурсов) карты;</li> <li>– точное пространственное совмещение разновременных космических снимков.</li> </ul>	
Размещение цифровой карты на WEB-портале	<ul style="list-style-type: none"> <li>– администрирование функционально-алгоритмической структуры WEB-портальной системы распространения геоинформационных данных;</li> <li>– обеспечение доступности оперативных и архивных геоинформационных данных;</li> <li>– обеспечение хранения оперативной информации;</li> </ul>	Интерфейс взаимодействия служб железнодорожного транспорта с системой мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного полотна и прилегающих территорий на основе



<b>Основные процессы</b>	<b>Перечень технологических операции</b>	<b>Получаемая технологическая информация</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– осуществление передачи данных по протоколу HTTP для каждого соединения между клиентом и сервером.</li> <li>– реализация служб и услуг на основе программных решений с открытым исходным кодом</li> </ul>	WEB-портальных решений.

Разработанная комплексная система мониторинга позволяет осуществлять совместный анализ данных [140] с привязкой к железнодорожной инфраструктуре (рисунок 5.4) с определением объемных деформация (опасных просадок земполотна, длинных неровностей пути, возникновения смещений ИССО и др.).

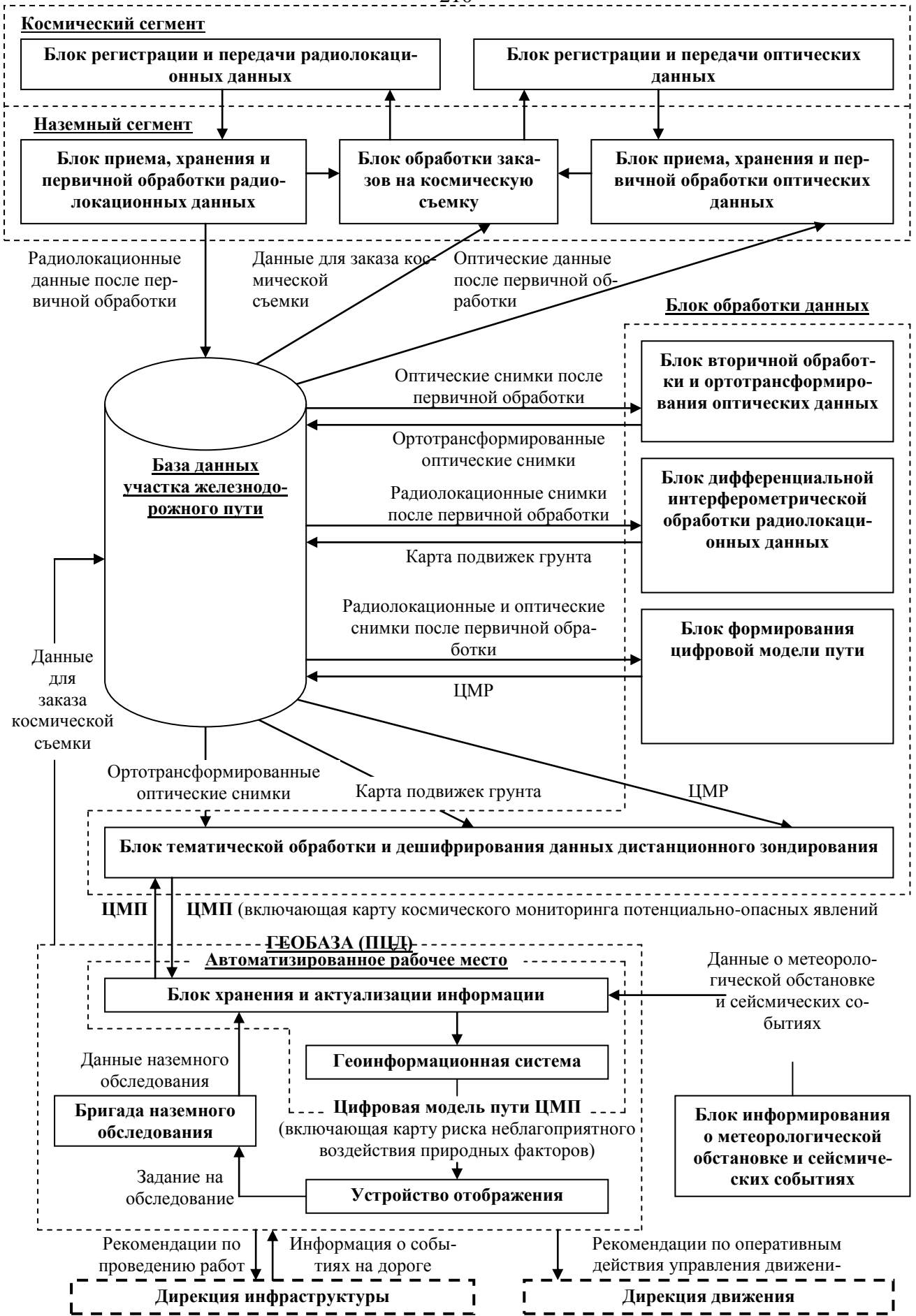


Рисунок 5.4 – Комплексная система мониторинга железнодорожного пути

Представленная система комплексного аэрокосмического мониторинга наиболее полно реализована в пилотном проекте мониторинга пути на участке Адлер-Туапсе Северокавказской железной дороги с участием отечественных и зарубежных данных космической и аэросъемки. Технологическая схема обеспечения спутниковыми данными для реализации пилотного проекта представлена на рисунке 5.5.

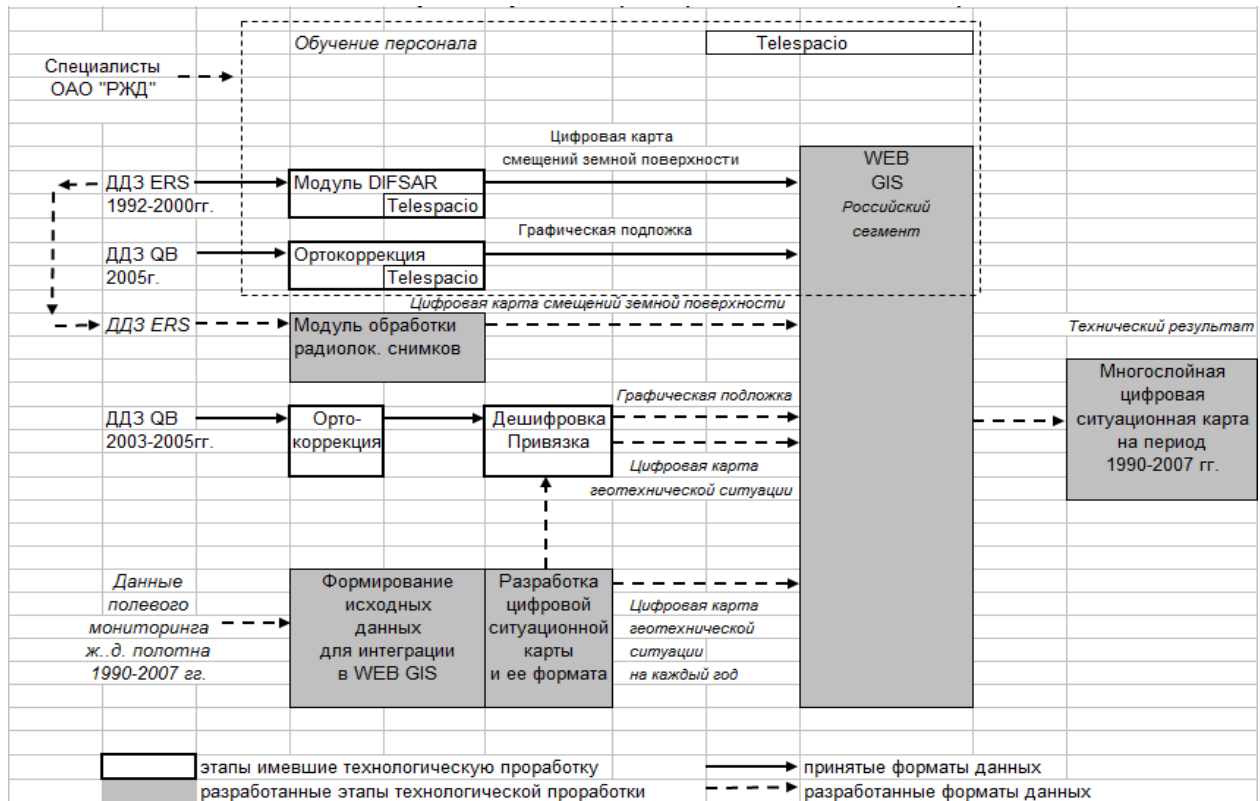


Рисунок 5.5

Технология оперативного спутникового мониторинга ЧС предусматривает проведение спутниковой съемки в с увеличенной частотой съемки до суток во время стремительного развития негативного воздействия на путь и ежемесячного планового мониторинга с целью контроля динамики состояния потенциально-опасных участков (рисунок 5.6), при этом наземные полевые исследования в рамках технологического процесса спутникового мониторинга проводятся силами дорожных служб только на участках, с наивысшей степенью опасности [208], а также на участках демонстрирующих негативную динамику (рисунок 5.7).



Рисунок 5.6

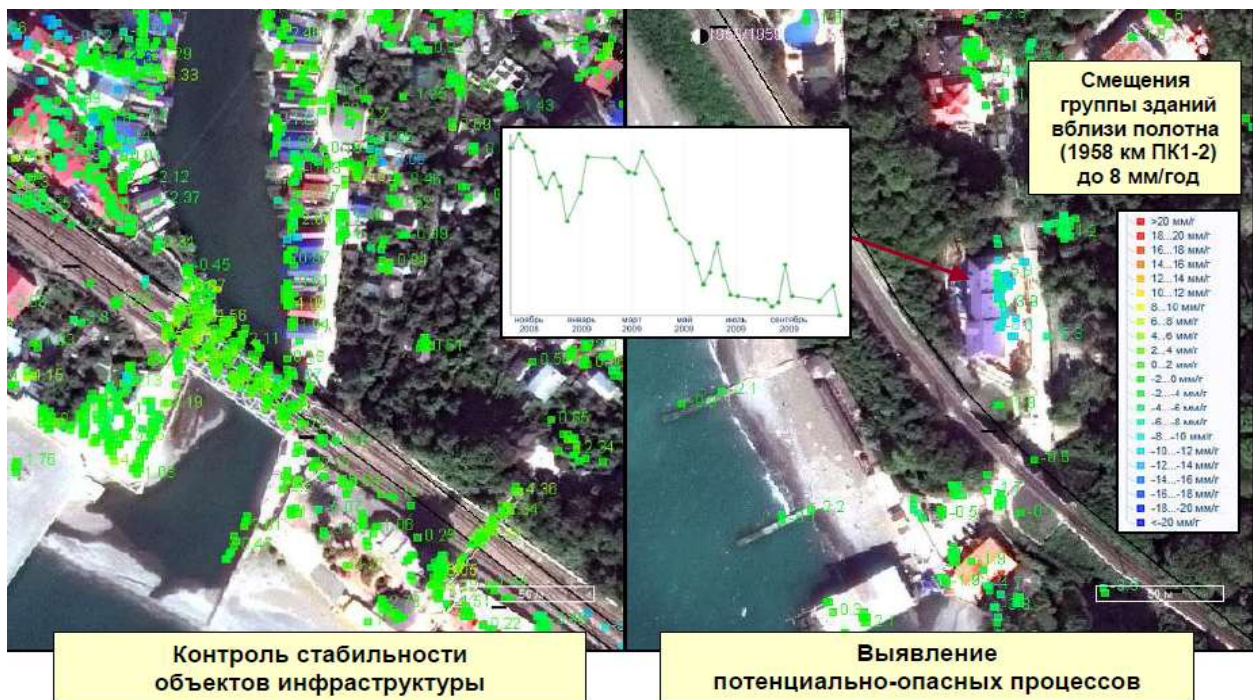


Рисунок 5.7

Для этого формируется задание на расширенное обследование/осмотр, которое содержит в себе краткую характеристику обследуемого участка, фрагмент карты, содержащий в себе результаты спутникового мониторинга в различных диапазонах с привязкой к пикетажу, гипотезу о возможных негативных процессах, происходящих на участке, а также ретроспективную информацию об опасных происшествиях, когда либо происходивших на этом участке. Кроме того, прила-

гаются материалы по распознаванию возникших негативных проявлений потенциальных или развивающихся чрезвычайных ситуаций по результатам дистанционного зондирования – обнаружение новообразовавшегося водоема, изменение береговых очертаний рек, озер или морей, появление или развитие оврагов и т.д. и т.п. (рисунок 5.8).

По результатам расширенного полевого обследования дорожные службы делают заключение о степени угрозы для железнодорожной инфраструктуры, выявленных по результатам спутникового мониторинга негативных факторов, и при необходимости дают рекомендации по проведению срочных защитных мероприятий на данном участке, или мероприятий по предотвращению или ликвидации чрезвычайной ситуации.



Рисунок 5.8 – Задание на расширенное полевое обследование

Организационная структура системы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути, включающая пользователей данных системы мониторинга, а также подразделения и службы задействованные в предоставлении исходных данных, приведена на рисунке 5.9.

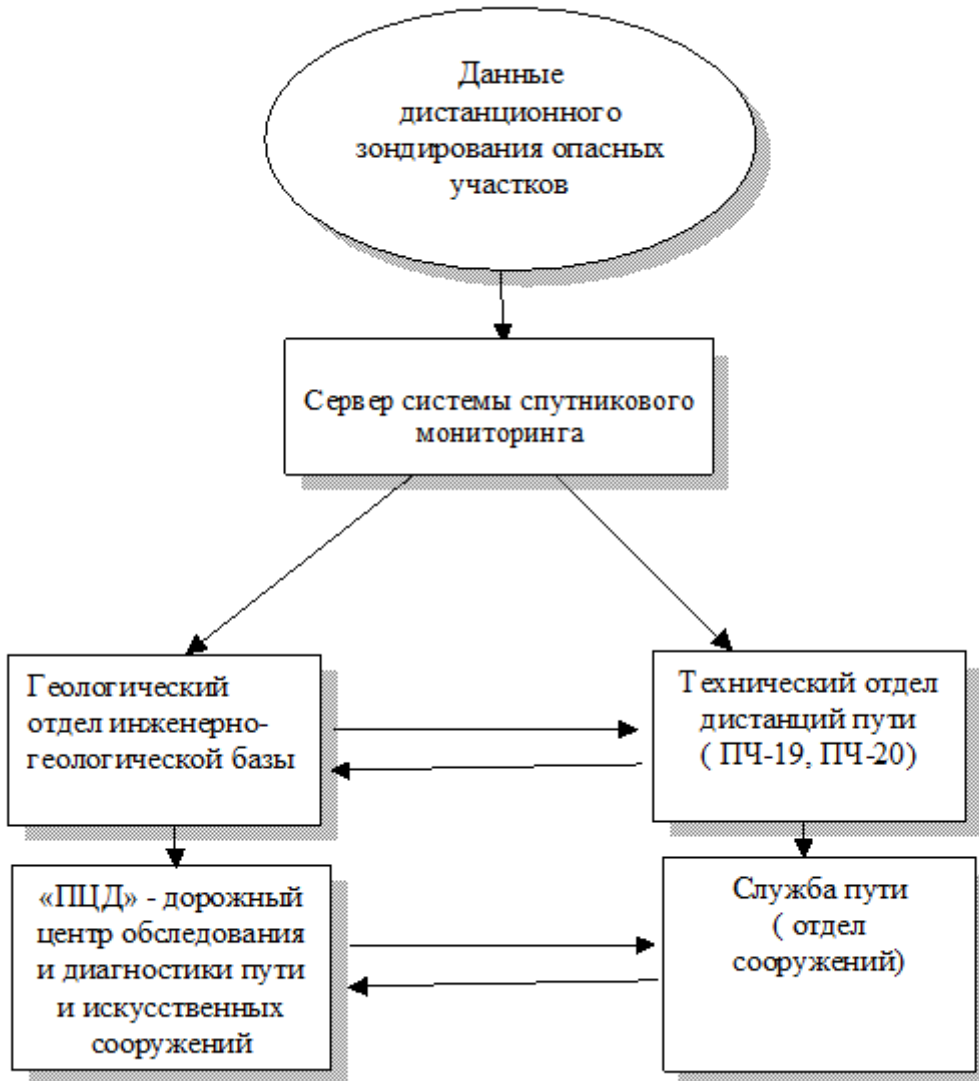


Рисунок 5.9 – Схема разрабатываемой системы мониторинга

Организационная структура системы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути подразумевает привлечение к использованию

результатов мониторинга, вырабатываемых при работе системы следующих подразделений и служб железнодорожного транспорта:

1. Геологический отдел инженерно-геологической базы (подразделение дорожного центра обследования и диагностики пути и искусственных сооружений).
2. Технический отдел дистанций пути СКЖД. (ПЧ-19, ПЧ-20).
3. Служба пути СКЖД (отдел сооружений).

Ядро (сервер) разрабатываемой системы спутникового мониторинга (ССМ) потенциально опасных участков железнодорожного пути предоставляет результаты обработки оптико-электронных снимков с космического аппарата (КА) QuickBird и радиолокационных снимков.

Обработанная информация о недопустимых рисках воздействия опасных природных факторов на железнодорожную инфраструктуру участка Туапсе-Адлер вносится в геоинформационную базу пространственных данных и поступает к пользователям средствами WEB - порталных технологий.

На уровне непосредственных пользователей (Краснодарское отделение Северо-Кавказской железной дороги) автоматизированные рабочие места (АРМ) системы установлены в геологическом отделе инженерно-геологической базы (г. Сочи) и технических отделах дистанций пути ПЧ-19 (ст. Туапсе) и ПЧ-20 (ст. Сочи), являющихся соответственно структурными подразделениями дорожного центра обследования и диагностики пути и искусственных сооружений (ПЦД - подчиняется службе пути дороги) и службы пути дороги.

По результатам оценки рисков возникновения скально-обвальных косогоров, сужения защитной береговой полосы, оползневых явлений, создающих реальную угрозу безопасности движения поездов отделом сооружений в составе службы пути дороги принимается решение о выезде на опасное место вагона инженерно-геологического обследования дороги (ВИГО) для проверки достоверности полученных данных, путём соответствующих измерений, в частности путём бурения и заборов проб грунта и замеров давления скальных пород.

На этапе отработки пилотного проекта на участке Туапсе-Адлер по результатам сопоставления обработанных данных спутникового мониторинга и наземного

обследования службой пути и руководством дороги принимается решение о неотложных необходимых объемах работ (рисунок 5.10) по ремонту, усилению и реконструкции сооружений на неустойчивых местах земляного полотна железнодорожной линии (укрепление земляного полотна с морской стороны, капитальный ремонт и новое строительство морских волноотбойных стен, строительство противооползневых подпорных стен, закрепление скально-обвальных косогоров, регуляция речных русел).

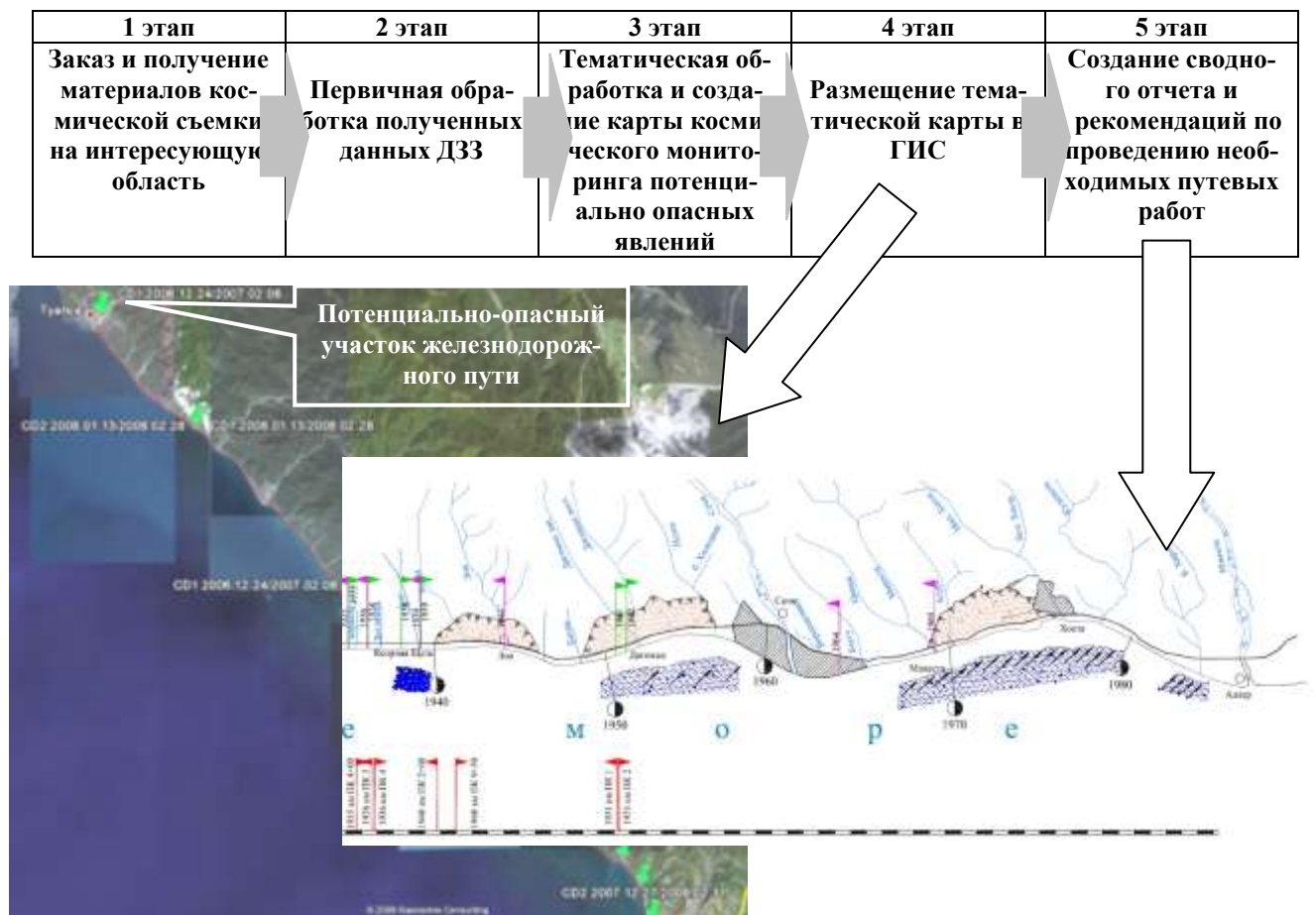


Рисунок 5.10 – Основные технологические этапы мониторинга

Таким образом, система мониторинга, основанная на современных спутниковых и геоинформационных технологиях, претерпела множество изменений и прошла путь от набора разрозненных методик диагностики до адаптированной к реальным условиям содержания земляного полотна комплексной системы мониторинга и прогнозирования, вобравшей в себя не только инновационные спутниковые методы, но и комплекс наземных, в том числе геологических обследований.



Новые функциональные возможности системы ведения путевого хозяйства при практическом внедрении методов радиолокационного мониторинга пути приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Классическая структура системы ведения путевого хозяйства	Предлагаемое расширение функционала системы	Основные новые возможности системы ведения путевого хозяйства при использовании системы космического радиолокационного мониторинга
Классификация путей по скорости движения и грузонапряженности	<i>Динамика</i> территориальных изменений прилегания пролегания пути, должна автоматически повышать <i>классность</i> пути	Возможность определения <i>динамики изменений микрогеометрии</i> пути, как комплексного пространственного объекта, и инженерных сооружений
↓ Определение вида и состава работ при техническом обслуживании	Критерии назначения путевых работ становится <i>динамика изменения</i> положения пути и объектов инфраструктуры (ИССО) на всей территории пролегания пути в комплексе	
↓ Дифференциация железнодорожной сети на участки определенного класса	Определение точных границ территории пролегания пути, потенциально опасных для движения, имеющих опасную динамику изменения геометрических параметров	↓ <i>Одномоментная</i> оценка происходящих изменений на протяженных участках пути (до 1000км)
↓ Комплексная оценка состояния пути	Параметры <i>динамики изменения</i> геометрических параметров ж.д. пути и объектов ИССО становится частью комплексной оценки	
↓ Планирование и организация работ	Путевые работы ведутся с целью прекращения динамических изменений в положении пути и ИССО и планируются на большие протяженности площадки и территории	

Разработанная комплексная система мониторинга протяженных потенциально-опасных участков железнодорожного пути с использованием аэрокосмической съемки апробирована и внедрена в рамках комплексного научно-технического проекта «Создание современных систем управления движением поездов и обеспечение безопасности движения (КНП-5)» Раздел 4 Пункт 4.10 «Разработка опытного образца системы и технологии мониторинга железных дорог на основе спутниковых технологий и геоинформационной базы данных (ГБД) по опасным природно-техногенным участкам на полигоне Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги и подтверждены патентом Российской Федерации на полезную модель № 2010116956/09 от 29.04.2010 «Система мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути».

## **6 Мониторинг железнодорожного пути средствами аэрокосмического наблюдения на участках воздействия тяжеловесных поездов с повышенными осевыми нагрузками**

Более 150 лет железные дороги России функционировали как единый централизованный механизм, ориентированный на экономическую эффективность функционирования всего комплекса в интересах государства.

При формировании ОАО «РЖД» и его последующем реформировании произошли существенные изменения в экономической модели функционирования. Сейчас ОАО «РЖД» - инфраструктурная Компания, заинтересованная, в первую очередь, в получении максимальной выручки за использование своей инфраструктуры перевозчиками – владельцами и арендаторами вагонов. Также ОАО «РЖД» заинтересованно максимально снизить затраты на содержание инфраструктуры при повышении уровня безопасности и эффективности её использования.

В настоящее время мы стоим на пороге очередного повышения осевой вагонной нагрузки до 27 тонн на ось. Созданы специальные конструкции вагонов, ориентированные на эксплуатацию с этой нагрузкой. Определены опытные полигоны, на которых будет проводиться подопытная эксплуатация составов из вагонов с повышенной осевой нагрузкой.

В решении этой задачи ключевое место занимают технологии мониторинга железнодорожного пути, как ключевой инфраструктурной составляющей, на которую приходится основное воздействие [201].

Головную роль в организации мониторинга играет определение изменения параметров и устройств содержания как верхнего строения пути, в первую очередь рельсовой колеи, так и пути в целом. Проведенные исследования в рамках работ плана НТР ОАО «РЖД» в период 2013-2016 годов и результаты фундаментальных исследований, позволяют утверждать, что приведение пути к «оптимальному» геометрическому состоянию и положению в пространстве позволяет следующее:

- снизить расходы на тягу за счет снижения сопротивления движению со стороны пути;
- минимизировать износ колес и рельсов;
- улучшить динамические параметры взаимодействия пути и подвижного состава.

Для решения определенных выше групп задач необходимо модернизировать существующую систему мониторинга железнодорожного пути методами глобального космического контроля (аспирантурой ГЛОНАСС/GPS, системами обработки данных дистанционного зондирования Земли), которые позволяют [112]:

- Охватывать измерениями геометрических параметров пути весь опытный полигон в единой системе координат;
- Оперативно отслеживать состояние не только на выбранных контрольных точках, но и на всем участке;
- Отслеживать объёмные деформации, имеющие протяженный характер и фактически меняющие геометрию пути всего полигона.

С учетом того, что опытные полигоны обращения составов из вагонов с повышенными осевыми нагрузками представляют собой замкнутые маршруты (рисунок 6.1), а состояние верхнего строения пути и его конструкции сильно дифференцированы, предлагается использовать максимально автоматизированные способы измерений, включающих 3 технологических уровня [113]:

1. Контрольные участки измерений геометрических параметров высоко-точной геодезической аппаратурой;
2. Данные вагонов-путеизмерителей с привязкой к глобальным системам координат с помощью аппаратуры ГЛОНАСС/GPS;
3. Материалы аэрокосмического дистанционного зондирования (радиолокационная и/или телевизионная съемка), позволяющие оценить геометрические параметры пути в комплексе (в том числе наличие длинных неровностей) с геометрическими параметрами объектов инфраструктуры, ИССО и прилегающими территориями (объемные деформации).



Рисунок 6.1

Предложенная технологическая схема (рисунок 6.2) мониторинга позволит охватывать измерениями весь опытный полигон тяжеловесного движения в единой глобальной системе координат [114, 116, 117, 118] оперативно отслеживать изменения состояния пути и прилегающих территорий, выявлять объемные деформации, имеющие протяженный характер и фактически меняющие геометрию пути всего участка [115]. В качестве примера на рисунке 6.3 приведем космического снимка Ковдорского горно-обогатительного комбината с подъездными путями.

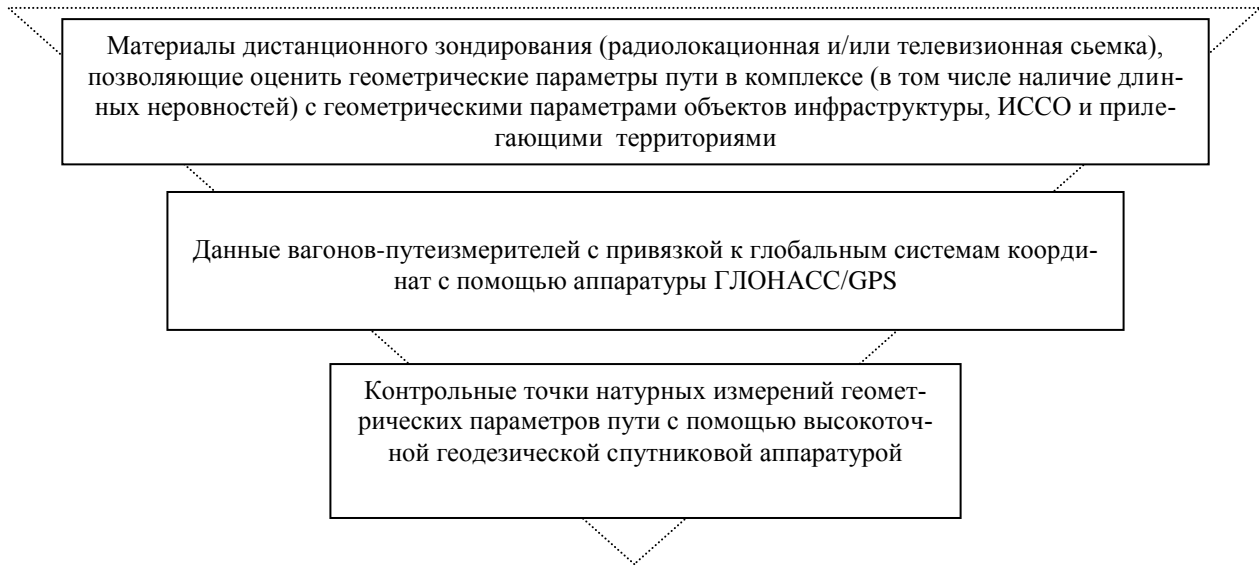


Рисунок 6.2



Рисунок 6.3

Представленная система мониторинга реализована в комплексном научном проекте плана НТР ОАО «РЖД»: «Оценка влияния применения в эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 тс на базе определения напряженно-

деформативного состояния верхнего строения пути и земляного полотна при воздействии поездов с вагонами с осевой нагрузкой 23,5 тс, 25 тс и 27 тс и интенсивности расстройств пути в эксплуатации от воздействия поездов с вагонами с нагрузкой 27 тс на ось».

В 2014-2016 годы на участке Ковдор – Мурманск Октябрьской железной дороги проводилась опытная эксплуатация вагонов с осевой нагрузкой 27 тс/ось. Опыта эксплуатации таких вагонов на сети железных дорог России не было. Ранее воздействие таких вагонов на верхнее строение пути и земляное полотно не изучалось. Действующие в настоящее время СТО РЖД 01.07.002-2010 и Технические требования к конструкции пути и его элементам для осевых нагрузок 25, 27, и 30 т/ось разрабатывались для осевых нагрузок 23,5 тс/ось. Было необходимо определить, как вагоны с повышенной осевой нагрузкой будут воздействовать на накопление деформаций и напряженно-деформированное состояние верхнего строения пути и земляного полотна, апробировать разработанные технологии глобального мониторинга и математического моделирования [200].

При организации испытаний использовался уникальный опыт железных дорог стран со сходным климатом и сложными географическими условиями, такими как электрифицированная дорога Нарвик-Кируна-Лулео (Швеция/Норвегия), трасса которой в значительной части проходит за Полярным кругом и по территориям со сложными топографическими условиями. Также был рассмотрен опыт решения различных проблем тяжеловесного движения железной дорогой Canadian Pacific (Канада), имеющей большую протяженность (около 1100 км), и также проходящей по сложному рельефу (рисунок 6.4).

Страна	Железные дороги	Ширина колеи	Специализация	Длина линии, км	Млн. т. брутто/год	Масса, тыс.т	Число вагонов	Осев. нагрузка, тс
Австралия	ВНР Ю	1435	Специализ. (ж.руда)	426 (+1000)	71,3 (125)	48,0	320	37,5
Австралия	Pilbara FMG	1435	Специализ. (ж.руда)	256	58	38,4	240	40
Бразилия	CVRD	1600	Специализированное	892	60	25,5	206	31,5
Канада	CP (до Ванкувера)	1435	Преимущ. специализ.	1100	25	13,2	110	30
Китай	Датонг-Кингхуан-гао.	1435	Специализированное (уголь)	663	300	20,0	200	25
Индия	IR, Jalgaon	1435	Смешанное	415	41	5,06		21,8
Россия	РЖД(Кузбасс-Находка-)	1520	Смешанное (уголь и др.)	5900	80	6,30;9,0, 12,0	от 70	23,5 (25)
США	UP	1435	Специализ. на уч	201	376- по всем местам доб. 73	17,5	135	32,5
			Преимущ спец	1200		15,5	120	32,5
Швеция/Норвегия	ICAB)	1435	Специализ.	497	13	8,52	68	31
Ю.Африка	Transnet	1067	Специализ.	860	46,2	41,0	342	30

Рисунок 6.4 – Показатели железных дорог мира с тяжеловесным движением

Программа исследований, утвержденная Старшим Вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем 24 июля 2014 г. № 307, предусматривала оценку напряженно-деформированного состояния и прочности элементов верхнего строения пути (по первому предельному состоянию), а также исследования по оценке деформативности пути (по второму предельному состоянию) впервые проводимые применительно к данной проблеме [198, 199].

Было необходимо определить, как вагоны с повышенной осевой нагрузкой будут воздействовать на накопление деформаций [196, 197] и напряженно-деформированное состояние верхнего строения пути и земляного полотна (рисунок 6.5), апробировать разработанные технологии глобального мониторинга и математического моделирования.



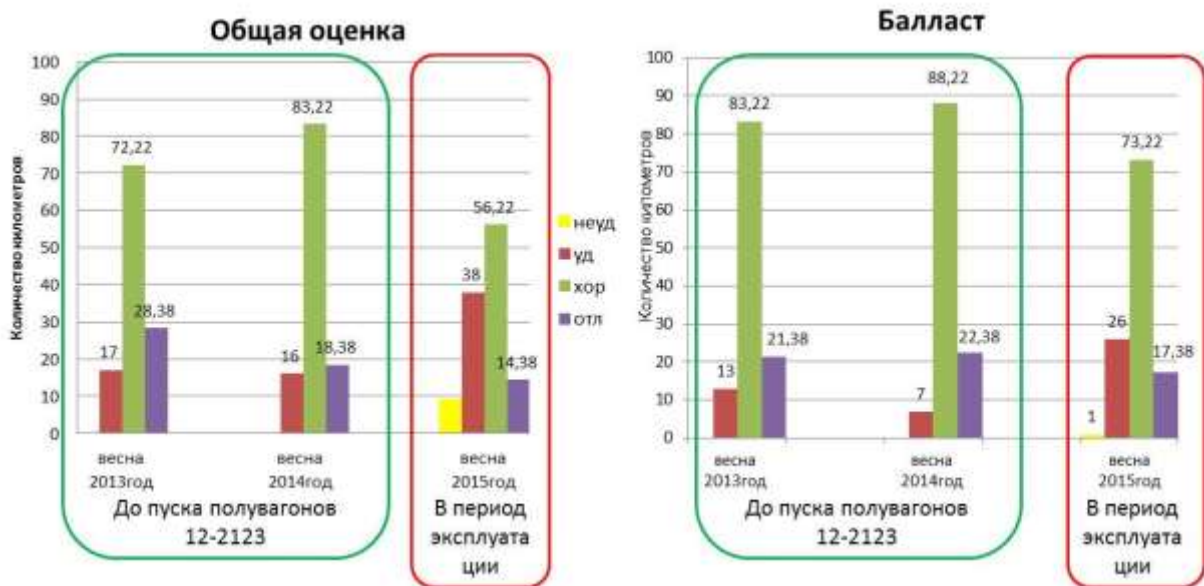


Рисунок 6.5 – Количество километров, оцененных "отлично", "хорошо", "удовлетворительно" и "неудовлетворительно" на участке Пинозеро-Ковдор по комплексной оценке состояния пути. В период: май 2013г.- май 2015г.

В качестве оперативного и низкочастотного способа мониторинга геометрических параметров железнодорожного пути на участках тяжеловесного движения применен способ съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛ) квадрокоптера-дрона (рисунок 6.6).



Рисунок 6.6 – Квадрокоптер с телевизионной камерой

Телевизионная съемка с квадрокоптера позволяет с высокой точностью и оперативностью выявлять изменение геометрических параметров пути одновременно на участке до нескольких сотен метров. Разработанная и приведенная в третьей главе диссертационной работы технология определения геометрических характеристик железнодорожного пути по телевизионным снимкам позволяет определять динамику изменения геометрических параметров длинных неровностей по материалам периодической съемки.

Технология определения длинных неровностей в плане заключается в следующем. Оператор дрона (квадрокоптера) направляет его в центр исследуемого участка железнодорожного пути и устанавливает съемку в зависимости от требуемой точности измерений и протяженности измеряемых длинных неровностей.

В качестве примера приведем современный аппарат китайской компании DJI Phantom 3. С помощью Phantom можно вести видеосъемку в формате UHD (4K). Он способен транслировать видео на расстояние до 2 километров. Камера расположена на 3-х осевом подвесе, обеспечивающим стабильную картинку без вибраций, а система GPS позволяет отслеживать месторасположение аппарата, когда он находится вне зоны прямой видимости. Время в полете составляет около 23 минут. Дрон устойчив к боковому ветру, легко управляется и имеет несколько режимов полета.

Основные характеристики заявленные производителем:

- максимальная скорость горизонтального полета - до 16 м/сек;
- UHD камера с разрешением 4096x2160p;
- угол зрения камеры 94 градуса;
- скорость вертикального взлета - 5м/сек;
- скорость снижения - 3 м/сек;
- видео можно транслировать на расстояние 2 км;
- наличие датчиков скорости и высоты;
- функции преследования и возврата домой;
- мощная зарядка для аккумулятора (100Вт);
- высота полета 6 километров.

Исходя из параметров таблицы 6.1, оптимальные высоты съемки для выявления длинных неровностей пути составляют 25-100 метров, при которых возможно определение длинных неровностей пути в плане с точностью 1-5 мм.

Таблица 6.1.

Высота съемки (м)	Протяженность измеряемых длинных неров- ностей (м)	Пространственное разрешение (мм)	Точность измере- ния геометриче- ских параметров пути в плане (мм)
<b>25</b>	<b>53,6</b>	<b>13,1</b>	<b>1,3</b>
<b>50</b>	<b>107,2</b>	<b>26,2</b>	<b>2,6</b>
<b>100</b>	<b>214,4</b>	<b>52,4</b>	<b>5,2</b>

После проведения съемки БПЛ передает снимок на пульт оператора, который затем обрабатывается для распознавания железнодорожного пути и определения его геометрических параметров в плане.

Для автоматизированного распознавания протяженных линейных объектов разработан специальный программный модуль "Автоматизированное распознавание". Основное рабочее окно программы служит для отображения снимка, на котором распознаются протяженные линейные объекты (рисунок 6.7).

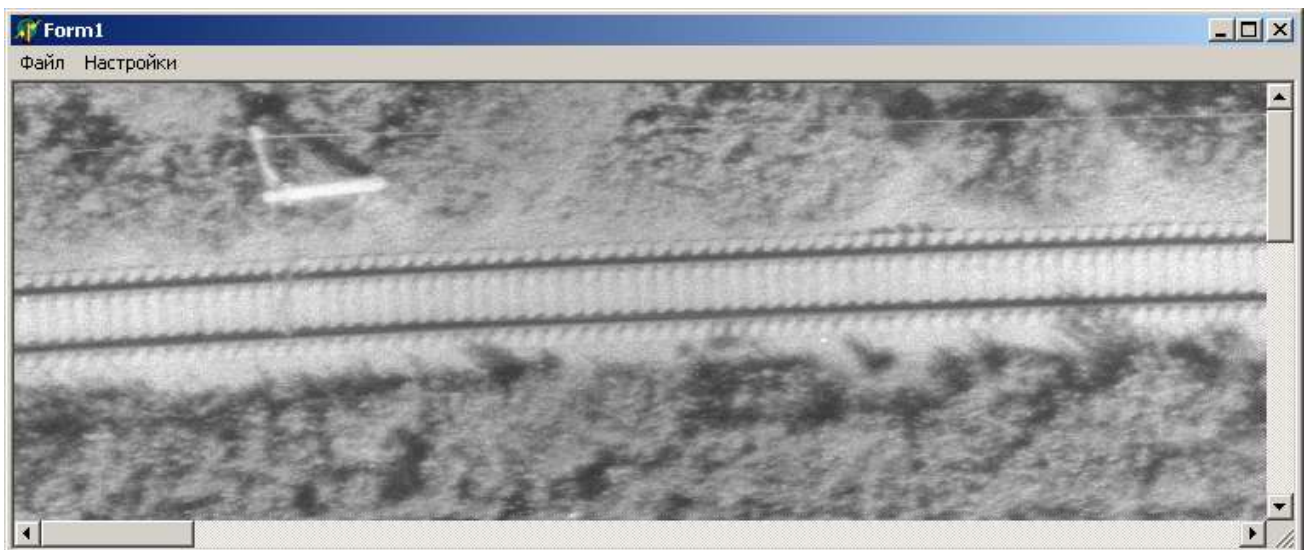


Рисунок 6.7

Для начала распознавания необходимо щелкнуть мышью на точку линейного объекта, с которой начнется его распознавание. После этого действия на экране ЭВМ появится окно для задания параметров автоматического распознавания (рисунок 6.8).

После того как все параметры определены и заданы, необходимо нажать кнопку "Автоматическое распознавание" и программа выполнит заданное количество шагов распознавания. Распознанный объект выделится на изображении в основном рабочем окне программы (рисунок 6.9).

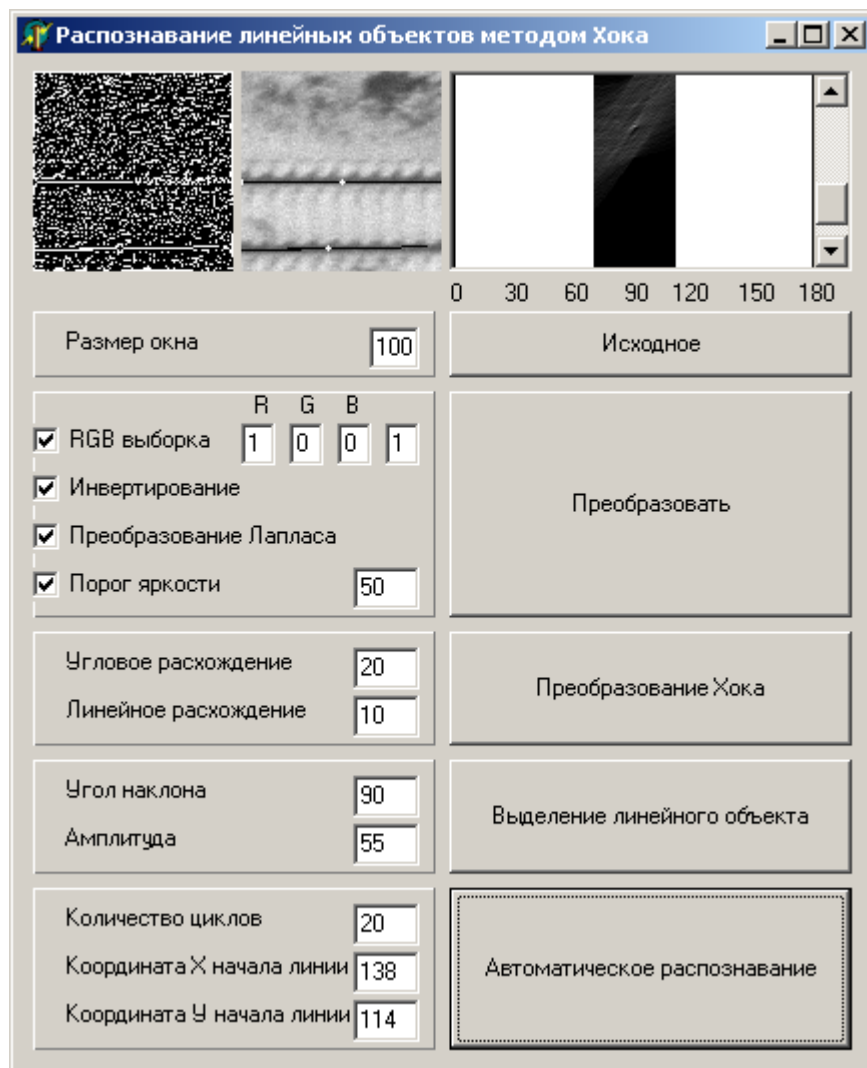


Рисунок 6.8

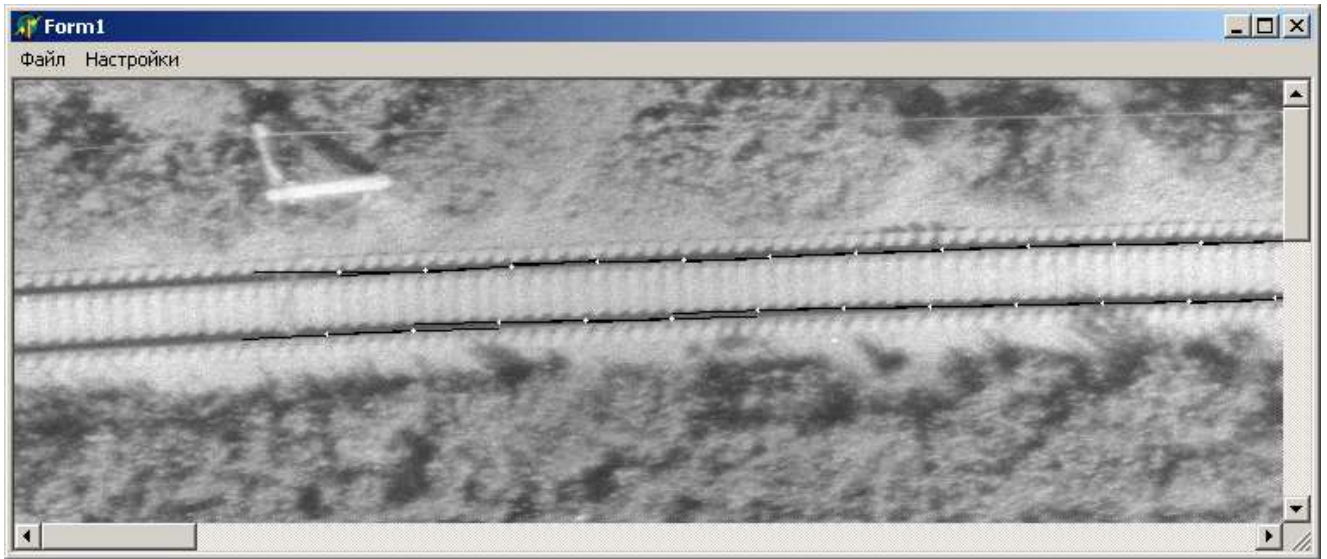


Рисунок 6.9

Для выявления изменений геометрических параметров пути во времени целесообразно проводить периодическую съемку потенциально-опасных участков пути. После взаимной привязки снимков по контурным точкам и распознавания железнодорожного пути можно с миллиметровой точностью определять изменения геометрических параметров пути в плане.

В ходе исследований на основании материалов телевизионной съемки с проверкой высокоточными геодезическими измерениями с привязкой к единой системе координат впервые были получены численные параметры длинных неровностей пути (объемных деформаций) на рисунке 6.10.

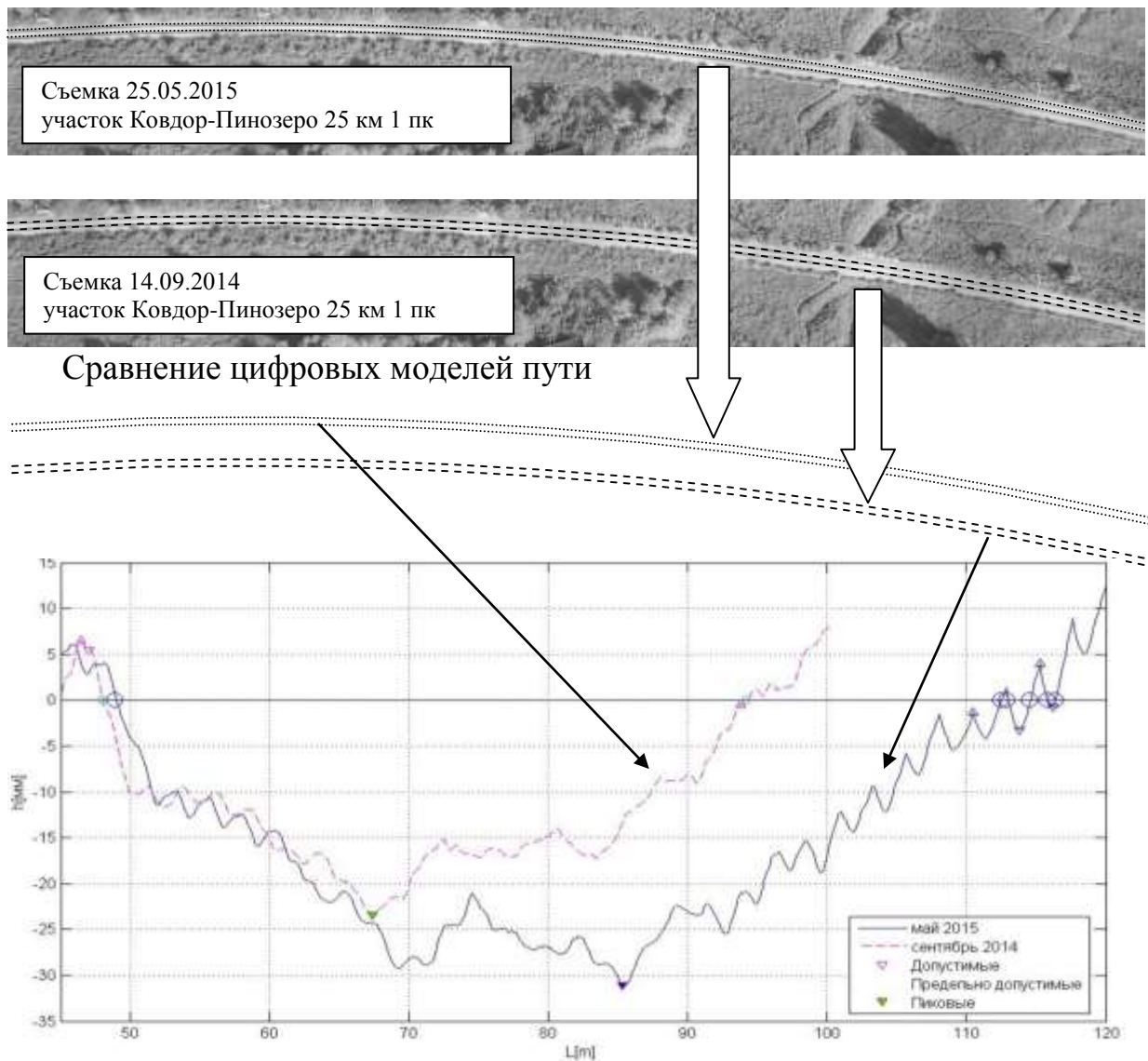


Рисунок 6.10 – Рост натурной неровности за период с сентября 2014 г. по май 2015 г. на 25 км участка Ковдор-Пинозеро

Аэросъемочное оборудование дронов позволяет вести съемку параллельно железнодорожному пути на высоте головки рельса, что позволяет выявлять относительные просадки железнодорожного пути (рисунок 6.11).

Съемка 25.05.2015  
участок Ковдор-Пинозеро 25 км 1 пк



Рисунок 6.11

Технология определения вертикальных неровностей повторяет технологию определения неровностей в плане. Ведется съемка параллельно железнодорожно-

му пути на высоте головки рельса [84]. Затем линия головки рельса распознается по методу Хока (рисунок 6.12) тем же программным обеспечением.

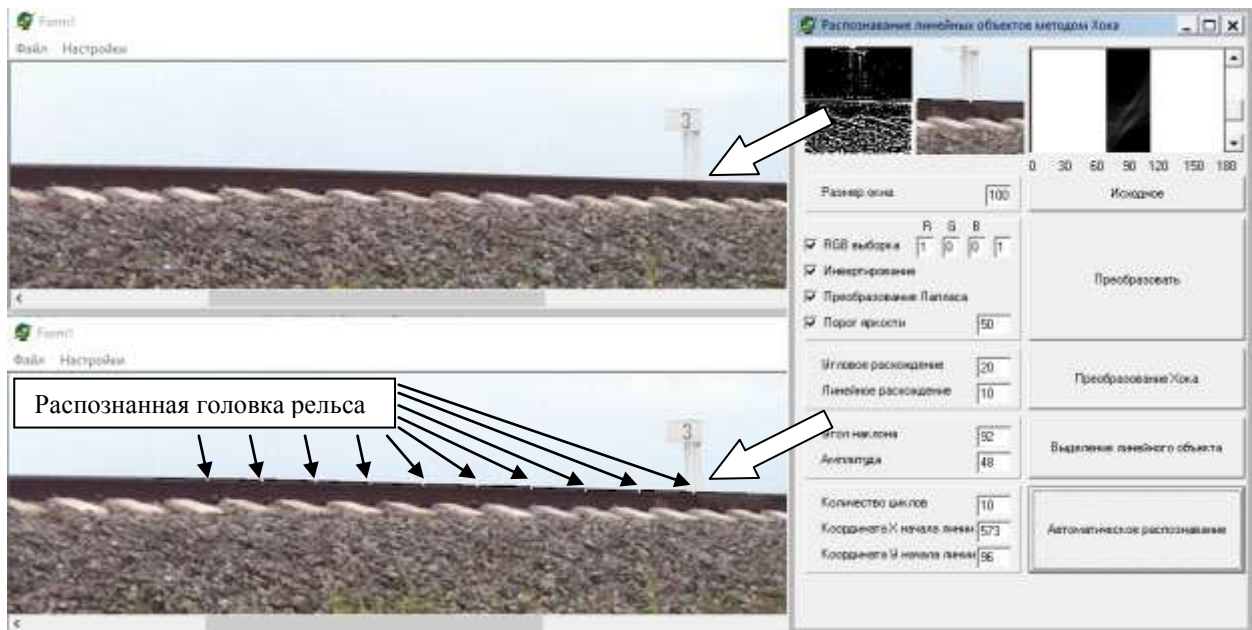


Рисунок 6.12

Применение методов глобального аэрокосмического мониторинга позволило не только отслеживать геометрические параметры пути на всем участке Ковдор-Мурманск, но и выявлять возникающие объекты, представляющие потенциальную угрозу для железнодорожного пути (водоемы, возникающие запруды, проводимые природные (мелиоративные) и строительные работы, меняющийся характер водостоков, оврагообразующие процессы и др.), тем самым выявляя зависимость состояния пути от состояния прилегающей территории [106].

Объемные деформации могут быть связаны с деформациями земляного полотна, причем параметры неровностей меняются с ростом пропущенного тоннажа [230]. Очевидно, что контроль параметров длинных неровностей может служить важным средством диагностики состояния земляного полотна под воздействием вагонов с повышенной осевой нагрузкой и тяжеловесных поездов [196].

Технологии дистанционного зондирования позволили выявить осадки железнодорожного пути с последующим уточнением контрольных точек нивелировкой (от 11 до 17 мм, рисунок 6.13). Что позволяет построить зависимость осадки



всего участка от пропущенного тоннажа, тем самым выходя на экономические параметры эксплуатации.

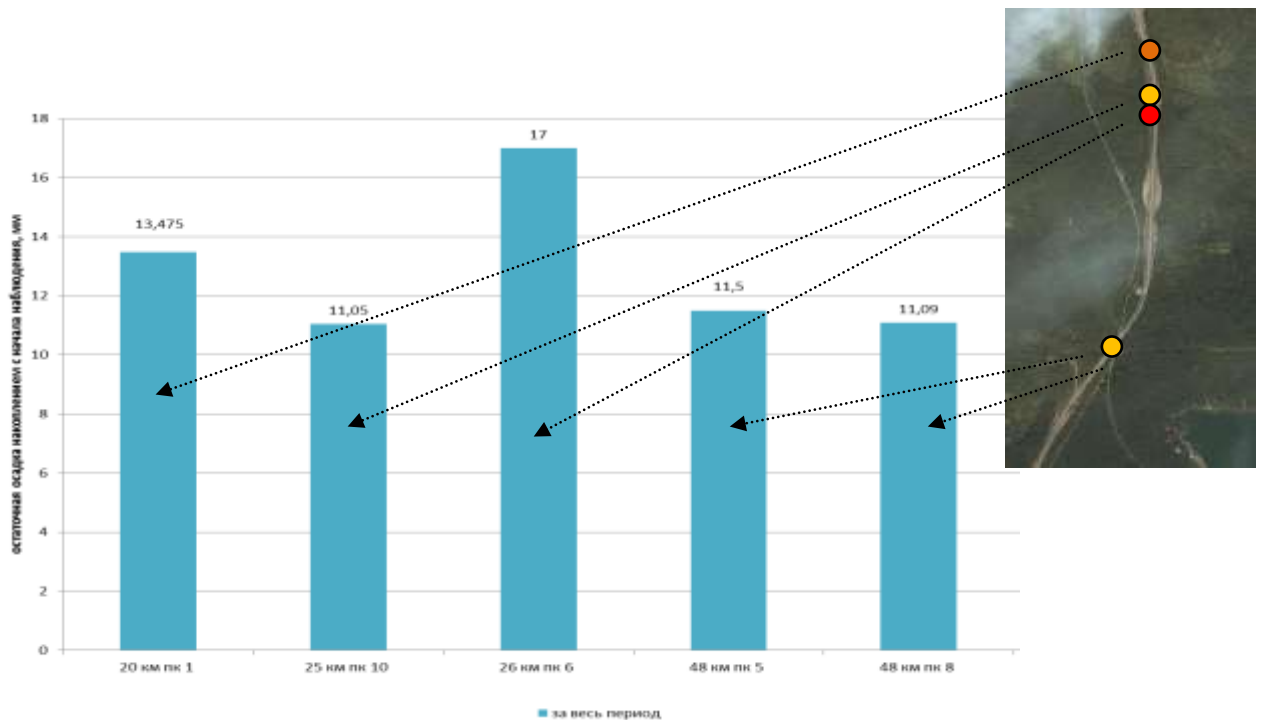


Рисунок 6.13

Проведенные наблюдения и результаты исследований состояния железнодорожного пути при введении повышенных осевых нагрузок с применением методов глобального спутникового мониторинга позволили сделать следующие выводы [112, 232]:

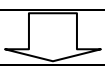
1. При введении в обращение нового подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками, необходимо его оценивать не только показателям прочности элементов верхнего строения, но и деформативности пути в целом;
2. Интенсификация перевозочного процесса приводит к росту деформаций пути, особенно на увлажненных грунтах (выявлено путем совместного анализа данных космического мониторинга прилегающих территорий и осадок пути);
3. Обращение вагонов с повышенными осевыми нагрузками целесообразно осуществлять на замкнутых маршрутах в специализированных вертушках для возможности периодического анализа состояния пути и прилегающих территорий по материалам данных дистанционного зондирования.

Результаты исследований будут использованы для внесения изменений в СТО РЖД 01.07.002-2010 и Технические требования к конструкции пути и его элементам для осевых нагрузок 25, 27, и 30 т/ось, а также послужить необходимым материалом для использования их для определения готовности того или иного участка на сети к пропуску поездов с повышенной осевой нагрузкой.


Результаты комплексного научного проекта мониторинга пути на участке Ковдор-Мурманск доложены на заседании Объединенного ученого совета (протокол №63 от 29 сентября 2015 года) и приняты в качестве обязательных научных рекомендаций (комплекс мероприятий) при введении тяжеловесного движения на участках сети.

Приведем расчет ожидаемого социально-экономического эффекта от внедрения разрабатываемых систем для информационно-технологического обеспечения мониторинга железнодорожного пути. В таблице 6.2 приводится перечень расширенных функциональных возможностей мониторинга железнодорожного пути при внедрении приведенных ранее систем и технологий.

Таблица 6.2

Дополнения в структуре системы ведения путевого хозяйства	Комплексное предложение по расширению функционала системы ведения путевого хозяйства при использовании новых аэрокосмических методов мониторинга ЧС (системы координат железнодорожной магистрали (1), космической системы мониторинга геометрических параметров (2), системы космического радиолокационного мониторинга (3), космической системы мониторинга ЧС (4))			
	1	2	3	4
Этап 1 Дополнение классификации путей	Дополнение к классификации требований к оценке уровня возможного природно-техногенного воздействия		<i>Динамика</i> территориальных изменений прилегания пролегания пути, должна автоматически повышать <i>классность</i> пути	Особенности территории, потенциально делающие участки пути опасными должны учитываться в классификации пути
				

<p><b>Этап 2</b> Определение вида и состава работ при техническом обслуживании</p>	<p>Определение вида и состава работ на прилегающих к железнодорожному пути территориях</p>	<p>Критерии назначения путей становится положение пути относительно оптимального для максимально безопасных скоростей движения для данных территорий («абсолютная ось» пути)</p>	<p>Критерии назначения путей становится <b>динамика изменения</b> положения пути и объектов инфраструктуры (ИССО) на всей территории пролегания пути в комплексе [233]</p>	<p>Определение вида и состава работ при ЧС на участках определенного класса «опасности»</p>
				
<p><b>Этап 3</b> Дифференциация железнодорожной сети на участки по критерию безопасности прилегающих территорий</p>	<p>Участки пути дифференцируются вместе с территорией пролегания пути</p>	<p>Учет земель полосы отвода ведется от «абсолютной оси» пути – проектного положения с оптимальными геометрическими параметрами для достижения максимальных скоростного движения</p>	<p>Определение точных границ территории пролегания пути, потенциально опасных для движения, имеющую опасную динамику изменения геометрических параметров</p>	<p>Участки дифференцируются исходя из анализа территориального фактора воздействия техносферы и окружающей среды</p>
				
<p><b>Этап 4</b> Комплексная оценка состояния пути</p>	<p>Оценка состояния железнодорожного пути оценивается, в том числе по состоянию территории пролегания пути</p>	<p>Возможность создания эталонной цифровой модели пути и объектов в полосе отвода и ведение комплексной оценки относительно этого положения</p>	<p>Параметры <b>динамики изменения</b> геометрических параметров ж.д. пути и объектов ИССО становится частью комплексной оценки</p>	<p>Комплексная оценка включает в себя степень возможного развития ЧС</p>

				
<b>Этап 5</b> Определение потребности в путевых работах	Определение потребности работ ведется также для прилегающих территорий	Возможность приведения положения пути к «оптимальному» для данной территории пролегания с для достижения максимально возможных безопасных скоростей движения	Путевые работы ведутся с целью прекращения динамических изменений в положении пути и ИССО и планируются на большие протяженности площадки и территории	Для каждого потенциально-опасного участка разрабатывается специальный сценарий ликвидации (предотвращения развития) ЧС

Разработанные системы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов (квадрокоптеров-дронов) съемки являются эффективными и малозатратными средствами выявления объемных деформаций для предотвращения ЧС. Аэро-съемка с малых высот позволяет получать оперативные данные о состоянии железнодорожного пути и динамике изменений геометрических параметров, как в горизонтальной плоскости, так и вертикальной [230].

## Заключение

В диссертации на основании проведенных научных исследований были проанализированы тенденции развития систем предупреждения и предотвращения ЧС, разработаны концепция, методы, технология и многоуровневая система аэрокосмического мониторинга и предупреждения ЧС на полигонах с интенсификацией перевозочного процесса в виде технических и технологических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны в части повышения безопасности железнодорожного транспорта.

Основные научные результаты и выводы заключаются в следующем:

1. В результате анализа доказано, что идет непрерывный процесс интеграции методов и средств мониторинга и предупреждения ЧС в единую информационно-управляющую систему.
2. Доказано, что существующая система мониторинга железнодорожного пути, включающая комплекс локальных инфраструктурных технических решений (реперные сети, путевые шаблоны, геодезическая аппаратура и др.) и средства сплошного контроля (вагон-путеизмеритель и др.), не позволяет выстраивать постоянно актуализируемую непрерывную пространственную модель состояния протяженного участка железнодорожного пути и прилегающих территорий.
3. Предложено применять средства глобального контроля – космические, авиационные и наземные средства дистанционного зондирования с высокоточной привязкой аппаратурой ГЛОНАСС/GPS для мониторинга протяженных участков железнодорожного пути.
4. Разработана концепция интеграции в единый технологический комплекс аэрокосмических и традиционных технологий мониторинга деформаций протяженных участков пути и прилегающих территорий для предупреждения и предотвращения ЧС.
5. Сформирована структура многоуровневой системы мониторинга и предупреждения ЧС на основе разработанной концепции.

6. Предложены и опробованы методы предупреждения ЧС путем оценки изменений железнодорожного пути и объектов на прилегающих территориях. По результатам внедрения определено, что предложенные методы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути с использованием космической радиолокационной съемки являются эффективными высокоточными средствами для предотвращения и предупреждения ЧС (определенная величина средней скорости вертикальной деформации участка железной дороги Сочи-Дагомыс (пос. Мамайка) составила 6,9 мм/год).

7. Разработана технология комплексного аэрокосмического мониторинга протяженных участков пути для предупреждения и предотвращения ЧС.

8. Система и технологические элементы комплексного аэрокосмического мониторинга и предупреждения ЧС внедрены на линиях в условиях повышения интенсивности перевозочного процесса (экспериментальных участках железнодорожного пути общей протяженностью более 300 км Октябрьской и Северо-Кавказской железных дорогах), а именно:

- технология реализована и внедрена для задач мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути на участке Адлер-Туапсе Северокавказской железной дороги в рамках выполнения работы плана НТР ОАО «РЖД» №19.5.011.Н «Разработка спутниковой технологии мониторинга потенциально-опасных участков пути (оползни, скально-обвальные участки и т.д.), с получением патента Российской Федерации на полезную модель;

- система комплексного мониторинга развита и реализована в рамках комплексного научно-технического проекта «Создание современных систем управления движением поездов и обеспечение безопасности движения (КНП-5)» Раздел 4 Пункт 4.10 «Разработка опытного образца системы и технологии мониторинга железных дорог на основе спутниковых технологий и геоинформационной базы данных (ГБД) по опасным природно-техногенным участкам на полигоне Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги. Получен патент Российской Федерации на полезную модель.

- технические и технологические решения разработаны и применены для исследования состояния железнодорожного пути при введении повышенных осевых нагрузок на экспериментальном полигоне Ковдор-Мурманск Октябрьской железной дороги в рамках выполнения работы плана НТР ОАО «РЖД»: «Оценка влияния применения в эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 тс на базе определения напряженно-деформативного состояния верхнего строения пути и земляного полотна при воздействии поездов с вагонами с осевой нагрузкой 23,5 тс, 25 тс и 27 тс и интенсивности расстройств пути в эксплуатации от воздействия поездов с вагонами с нагрузкой 27 тс на ось».

9. Результаты исследований состояния железнодорожного пути при введении повышенных осевых нагрузок на экспериментальном полигоне Ковдор-Мурманск показали следующее:

- повышение интенсивности перевозочного процесса приводит к росту деформаций пути и риску возникновения ЧС, особенно на увлажненных грунтах (выявлено путем совместного анализа данных мониторинга прилегающих территорий и осадок пути);

- при обращении вагонов с повышенными осевыми нагрузками на замкнутых маршрутах в специализированных вертушках целесообразно вести аэрокосмический мониторинг для возможности периодического анализа состояния пути и прилегающих территорий по материалам данных дистанционного зондирования;

- предложенная технологическая схема мониторинга с использованием аэрокосмических технологий позволит охватывать измерениями весь полигон и оперативно отслеживать изменения состояния пути и прилегающих территорий, выявлять очаги зарождения ЧС – деформации, имеющие протяженный характер и фактически меняющие геометрию пути всего участка.

10. Принципиальное отличие разработанной комплексной системы спутникового мониторинга заключается в комплексной обработке данных аэрокосмического дистанционного зондирования, а также натурных измерений и хронологической информации о событиях. Развитие систем аэрокосмического мониторинга ЧС позволит в дальнейшем определять с высокой точностью параметры протя-

женных деформаций пути и инфраструктурных сооружений (насыпи, мосты и др.) в течение длительного временного интервала.

11. Внедрение на экспериментальных участках железнодорожного пути общей протяженностью более 300 км Октябрьской и Северо-Кавказской железных дорог результатов диссертационного исследования подтверждает эффективность применения спутниковых технологий в целях мониторинга ЧС с дальнейшим тиражированием результатов.

12. Дальнейшие перспективы разработки темы заключаются в создании единой системы аэрокосмического мониторинга сети железных дорог Российской Федерации, интегрируемой в комплексный инновационный проект ОАО «РЖД» - «Цифровая железная дорога», что позволит на регулярной основе отслеживать очаги возникновения ЧС.



### Список сокращений

- GPS – глобальная навигационная система (США);
- ИНА – международная ассоциация тяжеловесного движения;
- БПЛ – беспилотный летательный аппарат;
- ВСП – верхнее строение пути;
- ГИС – геоинформационная система;
- ГЛОНАСС – глобальная навигационная система (Россия);
- ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли;
- ЕКА (ЕСА) – европейское космическое агентство;
- ЗП – земляное полотно;
- КА – космический аппарат;
- КНП – комплексный научный проект;
- КСПД ИЖТ – комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта;
- МПС – министерство путей сообщения;
- МСЖД – Московская железная дорога;
- МСЖД (УИС) – международный союз железных дорог;
- МЧС – министерство чрезвычайных ситуаций;
- НТР – научно-техническое развитие;
- ПО – программное обеспечение;
- СКЖД – Северо-Кавказская железная дорога;
- ЦММ – цифровая модель местности;
- ЦМР – цифровая модель местности;
- ЧС – чрезвычайные ситуации.

## Список литературы

1. Balashov, I. V. Development of remote sensing information data and derived products access systems [Text] / I. V. Balashov, V. Y. Efremov, E. A. Loupian, A. A. Mazurov, A. A. Proshin, V. A. Tolpin, E. V. Flitman // 30th Asian Conference on Remote Sensing 2009, ACRS 2009. – 2009. – P. 338-343.
2. Bartalev, S. Satellite monitoring of boreal ecosystems [Text] / S. Bartalev, E. Lupian // Nature. – 2005. – Т. 9. – P. 44-52.
3. Bartalev, S. A. A new locally-adaptive classification method lagma for large-scale land cover mapping using remote-sensing data [Text] / S. A. Bartalev, V. A. Egorov, E. A. Loupian, S. A. Khvostikov // Remote Sensing Letters. – 2014. – № 1. – P. 55-64.
4. Halle, W. Early warning of earthquakes by space-borne infrared sensors [Text] / W. Halle, D. Oertel, G. Schlotzhauer, B. Zhukov // D L R - Forschungsberichte. – 2008. – № 25. – P. 1-106.
5. Hanssen, R.F. Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry [Text] / R.F. Hanssen // Delft University Press, Delft. – 1998. – 137 pp.
6. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations. Infrastructure construction and maintenance issues = Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / ред-сов.: Б.М. Лapidус [и др.]. – Москва: Интекс, 2012. – 568 с.
7. Isaev, A. S. Earth observations from satellites as a unique instrument to monitor Russia's forests [Text] / A.S. Isaev, S.A. Bartalev, E.A. Lupyuan, N.V. Lukina // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – № 6. – P. 413-419.
8. Kashnitskii, A. V. Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives [Text] / A. V. Kashnitskii, E. A. Lupyuan, I. V. Balashov, A. M. Konstantinova // Atmospheric and Oceanic Optics. 2017. – № 1. – P. 84-88.
9. Kravchenko, A. N. Water resource quality monitoring using heterogeneous data and high-performance computations [Text] / A. N. Kravchenko, N. N. Kussul, E.

A. Lupian, A. Yu. Shelestov, V. P. Savorsky, L. Hluchy // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2008. – № 4. – P. 616-624.

10. Kussul, N. N. Determination of inundated territories on the basis of integration of heterogeneous data [Text] / N. N. Kussul, A. Yu. Shelestov, S. V. Skakun, E. A. Lupian, Yu. G. Tishchenko, L. Hluchy // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2007. – № 12. – P. 42-51.

11. Levin, B. A. GIS technologies railway transport of Russia [Text] / B. A. Levin, S. I. Matveev, D. S. Manoilo, M. M. Geleznov, R. I. Liah // *XXIX International conference and scientific discussion club. Gurzuf*. – 2002. – P. 141-143.

12. Loupian, E. A. Satellite monitoring of forest fires in russia at federal and regional levels [Text] / E. A. Loupian, A. A. Mazurov, E. V. Flitman, D. V. Ershov, G. N. Korovin, V. P. Novik, N. A. Abushenko, D. A. Altyntsev, V. V. Koshelev, S. A. Tashchilin, A. V. Tatarnikov, I. Csiszar, T. Loboda, A. I. Sukhinin, E. I. Ponomarev, S. V. Afonin, V. V. Belov, G. G. Matvienko // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. – 2006 –. № 1. – P. 113-145.

13. Makhutov, N. A. Engineering infrastructures: problems of safety and security in the russian federation [Text] / N. A. Makhutov, D. O. Reznikov, V.P.Petrov // *European Perspectives on Security Research*. – 2010. – P. 93-106.

14. Makhutov, N. Basic scenarios of terrorist attacks at hydropower engineering facilities [Text] / N. Makhutov, D. Reznikov, R. Khaziakhmetov // *Proceedings of the 3rd International Forum on Risk Analysis, Dam Safety Dam Security and Critical Infrastructure Management, 3IWRDD-FORUM 3rd International Week on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security, and Critical Infrastructure Management, 3IWRDD*. sponsors: IBERDROLA, iPresas S.L., Universitat Politecnica de Valencia (UPV), Ministerio de Ciencia e Innovacion (MICINN). – Valencia, 2012. – P. 389-394.

15. Makhutov, N. Risk monitoring and forecasting for complex safety systems of transport infrastructure and vehicles [Text] / N. Makhutov // *Quality of Life Research*. – 2014. – № 3. – P. 11-14.

16. Medvedeva, M. New method of analysis of climate-induced long-term vegetation dynamics in northern asia based on noaa avhrr data [Text] / M. Medvedeva,

I. Savin, S. Bartalev, E. Lupian // 30th Asian Conference on Remote Sensing 2009, ACRS 2009. – 2009. – P. 1964-1969.

17. Oertel, D. Airborne forest fire mapping with an adaptive infrared sensor [Text] / D. Oertel, K. Briess, W. Halle, M. Neidhardt, E. Lorenz, R. Sandau, F. Schrandt, W. Skrbek, H. Venus, I. Walter, B. Zender, B. Zhukov, J. Goldammer, A. Held, M. Hille, H. Brüggemann // International Journal of Remote Sensing. – 2003. –T. 24. – P. 3663.

18. Roghaei, M. An Efficient and Reliable Structural Health Monitoring System for Buildings after Earthquake [Text] / M. Roghaei, A. Zabiholah // APCBEE Proceedings. – 2014. – Vol. 9. – P. 309-316.

19. Samadi, A. Experimental and numerical investigation of stability of overhanging riverbanks [Text] / A. Samadi, E. Amiri-Tolkadany, M.H. Davoudi, S.E. Darby // Geomorphology. – 2013. – Vol. 184. – P. 1-19.

20. Savorskiy, V. Basic technologies of web services framework for research, discovery, and processing the disparate massive earth observation data from heterogeneous sources [Text] / V. Savorskiy, D. Ermakov, A. Chernushich, O. Panova, O. Kuznetsov, V. Vasilyev, E. Lupyan, I. Balashov, M. Burtsev, A. Proshin, V. Tolpin // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – ISPRS Archives 2014. – P. 223-228.

21. Shariff, F. Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system [Text] / F. Shariff, N.A. Rahim, W.P. Hew // Expert System with Application. – 2015. – Vol. 42, №3. – P. 1730-1742.

22. Shen, H. Slope stability analysis based on the integration of GIS and numerical simulation [Text] / H. Shen, H. Klapperich, S. M. Abbas, A. Ibrahim // Automation in Construction. – 2012. – Vol. 26. – P. 46-53.

23. Wang, M. L. Technologies for Civil Infrastructures [Text] / M. L. Wang, J.P. Lynch, H. Sohn // Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. – 2014. – Vol. 55. – P. 159-178.

24. Zheleznov, M. M. Seeking optimum track alignment location supported with geometric modeling provisions [Text] / M. M. Zheleznov, E. A. Sidorova // Vniizht Bulletin. – 2014. – № 2. – С. 23-26.
25. Zheleznov, M. M. Aerospace remote sensing based determination of track geometry characteristics [Text] / M. M. Zheleznov // Vniizht Bulletin. – 2012. – №5. – P. 1-7.
26. Zheleznov, M. M. Developing innovative technologies to be implemented with the track maintenance IT system [Text] / M. M. Zheleznov // Vniizht Bulletin. – 2013. – №1. – P. 15-18.
27. Zhukov, B. Detection and analysis of high-temperature events in the bird mission [Text] / B. Zhukov, K. Briess, E. Lorenz, D. Oertel, W. Skrbek // Acta Astronautica. – 2005. – Т. 56. – P. 65-72.
28. Zhukov, B. Spaceborne detection and characterization of fires during the bi-spectral infrared detection (BIRD) experimental small satellite mission (2001-2004) [Text] / B. Zhukov, E. Lorenz, D. Oertel, M.J. Wooster, G. Roberts // Remote Sensing of Environment. – 2006. – Т. 100. – P. 29-34.
29. Zhukov, B. Unmixing-based multisensor multiresolution image fusion [Text] / B. Zhukov, D. Oertel, F. Lanzl, G. Reinhäckel // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999. – Т. 37. – № 3I. – P. 1212-1226.
30. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли. Коллективная монография / под ред. А. И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2006. – 240 с.
31. Абдурашитов, А. Ю. О современных методах ремонта и содержания железнодорожной инфраструктуры. Создание передвижного диагностического путевого комплекса с использованием спутниковой навигации [Текст] / А. Ю. Абдурашитов, М. М. Железнов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2011. – №3. – С. 36-38.
32. Аванесов, Г. А. Анализ задач и условий телевизионных наблюдений космических объектов в проекте “Фобос-грунт” [Текст] / Г. А. Аванесов, М. М. Железнов, Б. С. Жуков, Е. Б. Краснопевцева // Сборник докладов выездного семинара под редакцией Р. Р. Назирова. – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С. 17.

33. Аванесов, Г. А. Стенд динамических испытаний бортовой аппаратуры измерения параметров орбиты и ориентации ИСЗ [Текст] / Г. А. Аванесов, Я. Л. Зиман, М. М. Железнов, Т. В. Кондратьева // Сборник докладов 5-ой международной конференции «Авиация и космонавтика-2006». – М.: МАИ. – 2006. – С.32.
34. Ададунов, С. Е. Оптимизация управления инфраструктурой и безопасностью движения [Текст] / С. Е. Ададунов, Е. Н. Розенберг, И. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 9. – С. 25-30.
35. Ададунов, С. Е. Оптимизация управления инфраструктурой на основе спутниковых технологий [Текст] / С. Е. Ададунов, Е. Н. Розенберг, И. Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. – С. 4-5.
36. Акимов, В. А. Пути решения проблем обеспечения комплексной безопасности и защищенности критически важных объектов техноинфраструктуры [Текст] / В. А. Акимов, А. К. Арабский, С. Г. Арутюнян, Ф. М. Дедученко, В. А. Докучаев, Р. А. Дурнев, В. И. Клецин, М. В. Маркосян, Н. А. Махутов, В. А. Меншиков, А. П. Мороз, А. С. Сигов // Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий: труды XX международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М.:ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – 2015. – С. 91-159.
37. Беляев, А. И. Состояние и перспективы развития российской системы дистанционного мониторинга лесных пожаров [Текст] / А. И. Беляев, Г. Н. Корovin, Е. А. Лупян [Текст] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – № 1. – С. 341-350.
38. Бондарец, В. А. Система диагностирования железнодорожного пути / В. А. Бондарец, А. С. Василейский, С. В. Духин, М. М. Железнов // Патент Российской Федерации на полезную модель, рег. №2010113544/11 от 07.04.2010. – М.: Роспатент, 2010.
39. Бондарец, В. А. Система определения местоположения технологических объектов / В. А. Бондарец, С. В. Духин, М. М. Железнов, И. Н. Розенберг, Н. В. Сазонов, В. И. Уманский // Патент Российской Федерации на полезную модель, рег. №2009117266/22 от 06.05.2009. – М.: Роспатент, 2009.

40. Бондарец, В. А. Система управления транспортными объектами на полигоне железной дороги / В. А. Бондарец, С. В. Духин, М. М. Железнов, Д. Г. Кривдин, Н. В. Сазонов // Патент Российской Федерации на полезную модель, рег. № 2010113548/09 от 07.04.2010. – М.: Роспатент, 2010.

41. Василейский, А. С. Автоматизированное распознавание железнодорожных путей по данным дистанционного зондирования железнодорожных магистралей [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов // Труды научно-практической конференции Неделя науки - 2005 "Наука - транспорту". – М.: МИ-ИТ. – 2005. – С. XII-6.

42. Василейский, А. С. Алгоритмы координатной привязки космических видеоданных по навигационным измерениям [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2003. – №4. – С. 37-43.

43. Василейский, А. С. Возможности использования специализированного сервиса РЖД-SAT для решения задач мониторинга железнодорожной инфраструктуры [Текст] / А. С. Василейский, Е. А. Лупян, А. И. Карелов, Ю. С. Крашенинникова, А. А. Прошин, В. П. Саворский, И. А. Уваров, М. А. Щеглов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – № 2. – С. 34-49.

44. Василейский, А.С. Геометрическая и радиометрическая калибровка съемочных систем на линейных ПЗС [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман // Сборник докладов выездного семинара под редакцией Р. Р.Назирова. – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С. 18.

45. Василейский, А. С. Интерферометрическая обработка спутниковой радиолокационной информации для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, В. В. Милосердов, В. И. Уманский // Материалы 6-ой всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2008. – М.:ИКИ РАН. – С. 153-158.

46. Василейский, А. С. Комплекс координатно-временного обеспечения КА "Метеор-М", его испытания и использование для оперативной координатной привязки видеоданных ДЗЗ [Текст] / А. С. Василейский, Я. Л. Зиман, М. М. Железнов // Сборник тезисов VIII международной молодежной научно-практической конференции «Человек и космос». – Днепропетровск: НЦАОМУ. – 2006. – С.53.

47. Василейский, А. С. Координатно-временное обеспечение космического аппарата "Метеор-М" №1 [Текст] / А.С. Василейский, М.М. Железнов, М.И. Куделин, В.В. Наумов, А.Л. Чуркин // Материалы 4-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.80.

48. Василейский, А. С. Методика автоматизированного распознавания железнодорожных путей по данным дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения [Текст] / А.С. Василейский, М.М. Железнов // Вестник МИИТа. – М.: МИИТ. – вып.5. – 2005. – С. 62-64.

49. Василейский, А. С. Методика автоматизированного распознавания железнодорожных путей по данным дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов // Безопасность движения поездов: труды V научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2005. – С. VII-18.

50. Василейский, А. С. Исследование методов совмещения видеоданных дистанционного зондирования: дис. ... канд. ф.-м. наук: 25.00.35 / Железнов Максим Максимович. – М., 2003. – 160 с.

51. Василейский, А. С. Методика геометрической калибровки аппаратуры ДЗЗ на линейных ПЗС-детекторах путем съемки звездного неба [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман // Материалы 2-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2004. – С.86.

52. Василейский, А. С. Методика геометрической калибровки многозональных съемочных устройств на линейных ПЗС-детекторах [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман // Материалы 3-й открытой всероссийской



конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2005. – С.79.

53. Василейский, А. С. Методика и программное обеспечение обработки алгоритмов геометрической коррекции изображений, получаемых цифровыми аэрокамерами [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, И. В. Полянский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. –2005. –Том I. – С. 210-215.

54. Василейский, А. С. Методика и программное обеспечение обработки алгоритмов геометрической коррекции изображений, получаемых цифровыми аэрокамерами [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, И. В. Полянский // Материалы 2-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2004. – С. 87.

55. Василейский, А. С. Методика и стенд динамических испытаний аппаратуры координатно-временного обеспечения КА серии "Метеор-М" [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман // Материалы 4-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.81.

56. Василейский, А. С. Методика и стенд динамических испытаний систем координатно-временного обеспечения КА [Текст] / А.С. Василейский, М.М. Железнов, Я.Л. Зиман, Т.В. Кондратьева // Сборник докладов выездного семинара под редакцией Р.Р.Назирова. – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С. 31.

57. Василейский, А. С. Методика наземной геометрической калибровки съемочных камер на линейных ПЗС [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, И. В. Полянский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Том I. – С. 216-221.

58. Василейский, А. С. Мониторинг потенциально-опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру с использованием космических систем ДЗЗ [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, А. Ю. Макаров // Вестник научно-

исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – №6. – С. 16-19.

59. Василейский, А. С. О применении космического дистанционного зондирования для целей оперативного мониторинга экологической обстановки и чрезвычайных ситуаций на железнодорожных магистралях [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов // Безопасность движения поездов: труды VI научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2005. – С. VI-5.

60. Василейский, А. С. О применении космического дистанционного зондирования для целей оперативного мониторинга экологической обстановки и чрезвычайных ситуаций на железнодорожных магистралях [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов // Безопасность движения поездов: труды VI научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2005. – С. VI-5.

61. Василейский, А. С. Оперативная координатная привязка видеоданных ДЗЗ с использованием навигационной информации комплекса координатно-временного обеспечения ПЗС [Текст] / Василейский А. С., Железнов М. М., Зиман Я. Л. // Сборник докладов выездного семинара под редакцией Р.Р.Назирова. – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С. 15.

62. Василейский, А. С. Оперативная координатная привязка видеоданных ДЗЗ с использованием навигационной информации комплекса координатно-временного обеспечения [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов // Сборник тезисов III Конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.44.

63. Василейский, А. С. Определение в полете связи систем координат аппаратуры ДЗЗ и приборов астроориентации [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, А. В. Никитин // Материалы 4-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.82.

64. Василейский, А. С. Определение элементов фотограмметрической реконструкции изображений, получаемых цифровой аэрокамерой на линейных ПЗС [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, И. В. Полянский // Ма-

териалы 2-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2004. – С.85.

65. Василейский, А. С. Повышение точности координатной привязки данных дистанционного зондирования Земли [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, А. А. Форш // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2003. – №4. – С. 62-65.

66. Василейский, А. С. Система контроля потенциально-опасных участков железнодорожного пути с использованием данных дистанционного зондирования Земли / А. С. Василейский, С. В. Духин, М. М. Железнов, А. И. Карелов, А. Ю. Макаров, И. Н. Розенберг, Н. В. Сазонов, Н. В. Чернова // Патент Российской Федерации на полезную модель, рег. № 2009115803/22 от 27.04.2009. – М.: Роспатент, 2009.

67. Василейский, А. С. Система мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути / А. С. Василейский, М. М. Железнов, И. Н. Розенберг, А. И. Карелов, А. Ю. Макаров, Н. В. Сазонов, Н. В. Чернова // Патент Российской Федерации на полезную модель, рег. № 2010116956/09 от 29.04.2010. – М.: Роспатент, 2010.

68. Василейский, А. С. Технология автоматизированного распознавания железнодорожных путей по данным дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения [Текст] / А. С. Василейский, М. М. Железнов // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2005. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2005. – С. 40-41.

69. Владимиров, В. А. Прогноз основных опасностей и угроз на территории России, оценка риска чрезвычайных ситуаций федерального и регионального уровней и перспектив развития МЧС России, РСЧС и гражданской обороны на период до 2010 года [Текст] / В. А. Владимиров, Н. Н. Долгин, В. П. Малышев, Н. А. Махутов, В. И. Осипов // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – № 2. – С. 727-760.

70. Гаденин, М. М. Структура многоуровневого мониторинга параметров безопасности техносферы и окружающей среды [Текст] / М. М. Гаденин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2012. – № 1. – С. 93-102.
71. Гапанович, В. А. Инфраструктура в условиях интенсификации перевозок [Текст] / В. А. Гапанович, В. О. Певзнер, О. А. Суслов, В. В. Третьяков // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 3. – С. 16-20.
72. Гапанович, В. А. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта [Текст] / В. А. Гапанович, И. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 4. – С. 5-11.
73. Гапанович, В. А. Построение системы ситуационного управления чрезвычайными ситуациями в ОАО «РЖД» [Текст] / В. А. Гапанович, И. Н. Розенберг, А. М. Замышляев // Надежность. – 2010. – № 4. – С. 2-11.
74. Гапанович, В. А. Решение проблем конструкционной прочности и техногенной безопасности на железнодорожном транспорте [Текст] / В. А. Гапанович, Н. А. Махутов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2007. – № 14. – С. 6-9.
75. Долгий, А. И. Нечеткая временная модель представления информации в интегрированных системах диагностики пути [Текст] / А. И. Долгий, М. М. Железнов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – №2. – С. 104-111.
76. Духин С. В. Единое геоинформационное пространство железных дорог [Текст] / С. В. Духин, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, С. И. Матвеев // Железнодорожный транспорт. – 2008. – №10. – С. 26-29.
77. Елисеев, С. В. Северо-Муйский туннель и технологии системного подхода к управлению безопасностью технических объектов [Текст] / С. В. Елисеев, Н. М. Быкова, С. К. Каргопольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2007. – № 3. – С. 93-96.
78. Еремушкин, А. А. Эксперимент по созданию цифровой модели пути экспериментального железнодорожного кольца [Текст] / А. А. Еремушкин, Б. Н. Зензинов, Н. Б. Баланцев, Д. С. Манойло, А. А. Батраков, А. С. Тихонов, А. С.

Матвеев // Безопасность движения поездов: труды IV научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2003. – С. III-12.

79. Ерохин, Ю. А. Обоснование требований к перспективной системе управления движением [Текст] / Ю. А. Ерохин, М. М. Железнов // Безопасность движения поездов: труды V научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2003. – С. VII-17.

80. Железнов М. М. Концепция мониторинга макротерриториальных деформаций железнодорожного пути с использованием космических технологий [Текст] / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, А. С. Василейский, А. И. Карелов, Е. А. Сидорова // Научное обеспечение инновационного развития и повышения эффективности деятельности железнодорожного транспорта: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / Под ред. Б. М. Лapidуса. – М.: Mittel Press, 2014. – С. 97-111.

81. Железнов, М. М. Автоматизированная система создания и ведения земельного кадастра железнодорожного транспорта аэросъемки [Текст] / М. М. Железнов, А. Ю. Макаров, В. А. Смородинский // Применение геоинформационных и спутниковых радионавигационных систем на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов. Выпуск 1001. – М.: МИИТ. – 2005. – С. 33-34.

82. Железнов, М. М. Аэрокосмические методы мониторинга чрезвычайных ситуаций на территории пролегания железнодорожной инфраструктуры [Текст] / М. М. Железнов, В. М. Пономарев // Мир транспорта. – 2017. – №4. – С. 86-95.

83. Железнов, М. М. Видеограмметрический комплекс контроля состояния автодорожного полотна [Текст] / М. М. Железнов, А. А. Сабирзянов, Р. А. Павлов // Труды научно-практической конференции Неделя науки - 2005 "Наука - транспорту". – М.: МИИТ. – 2005. – С. XII-5.

84. Железнов, М. М. Видеограмметрический комплекс создания цифровых моделей объектов железнодорожного транспорта [Текст] / М. М. Железнов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев, С. Ю. Юдин // Труды научно-практической конфе-

ренции Неделя науки - 2005 "Наука - транспорту". – М.: МИИТ. – 2005. – С. XII-7.

85. Железнов, М. М. Геоинформационные системы и технологии на железнодорожном транспорте [Текст] / М. М. Железнов // Геоинформационные технологии и спутниковые радионавигационные системы на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов. Выпуск 930. – М.:МИИТ. – 2002. – С. 96-98.

86. Железнов, М. М. Геометрическое моделирование железнодорожного пути в плане с применением методов сплайн-интерполяции [Текст] / М. М. Железнов, Е.А. Сидорова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 4 (60). – С. 109-114.

87. Железнов, М. М. Испытательный полигон геоинформационных технологий [Текст] / М. М. Железнов, А. С. Матвеев, Д. С. Манойло // Мир транспорта. – 2012. – № 1. – С. 118-121.

88. Железнов, М. М. Концепция мониторинга и содержания инфраструктуры транспортных железнодорожных коридоров стран СНГ «пространства 1520» на основе спутниковых и геоинформационных технологий [Текст] / М. М. Железнов // Сборник докладов Международного форума «Транспортная наука: инновационные решения для бизнеса» (Москва, 22 – 23 марта 2011). – М. – С. 95.

89. Железнов, М. М. Концепция мониторинга и содержания инфраструктуры транспортных железнодорожных коридоров стран СНГ «пространства 1520» на основе спутниковых и геоинформационных технологий [Текст] / М. М. Железнов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» . – 2011. – №2. – С. 34-37.

90. Железнов, М. М. Координатно-временное обеспечение КА ДЗЗ «Ресурс-ДК1» [Текст] / М. М. Железнов, А. Ю. Макаров // Проблемы геоинформатики и спутниковой навигации железнодорожного транспорта: труды международной научно-технической конференции. – М.: МИИТ. – 2007. – С.21.

91. Железнов, М. М. Космический мониторинг потенциально-опасного взаимодействия железной дороги с окружающей средой в сложных климатиче-

ских условиях [Текст] / М. М. Железнов, С. Ю. Завьялов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2014. – Том 1. – С. 180-183.

92. Железнов, М.М. Метод оптимизационного моделирования геометрических параметров трассы железнодорожного пути в плане [Текст] / М.М. Железнов, Е.А. Сидорова // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2014. – Том 1. – С. 555-558.

93. Железнов, М. М. Метод оптимизационного моделирования геометрических параметров трассы протяженных участков железнодорожного пути [Текст] / М. М. Железнов, Е. А. Сидорова // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития: сб. трудов молодых ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричиани. – М.: Интекст, 2013. – С. 208-214.

94. Железнов, М. М. Методика и алгоритм определения в полете взаимной выставки аппаратуры ДЗЗ и звездных координаторов [Текст] / М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, А. А. Форш // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – Том I. – С. 116-119.

95. Железнов, М. М. Методика, стенд и программное обеспечение геометрической калибровки мультиспектральных сканирующих устройств [Текст] / М. М. Железнов, Р. М. Шашурин // Сборник тезисов III Конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.44.

96. Железнов, М. М. Методика, стенд и программное обеспечение геометрической калибровки съемочных систем на линейных ПЗС [Текст] / М. М. Железнов, Я. Л. Зиман, А. С. Василейский // Сборник тезисов VIII Международной молодежной научно-практической конференции «Человек и космос». – Днепропетровск: НЦАОМУ. – 2006. – С.54.

97. Железнов, М. М. Моделирование движения спутников при дистанционном зондировании железнодорожных магистралей [Текст] / М. М. Железнов, А. Ю. Макаров, В. В. Соколюк // Труды научно-практической конференции Неделя науки - 2005 "Наука - транспорту". – М.: МИИТ. – 2005. – С. XII-5.

98. Железнов, М. М. Научное метрологическое сопровождение [Текст] / М. М. Железнов, А. В. Савин, А. В. Климов // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 5. – С. 40-42.

99. Железнов, М. М. Научные основы моделирования взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации [Текст] / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, С. С. Надежин // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 4. – С. 21-30.

100. Железнов, М. М. О концепции информационно-технологического совершенствования системы ведения путевого хозяйства на основе инновационных технологий, в том числе спутниковых [Текст] / М. М. Железнов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2012. – №5. – С. 1-7.

101. Железнов, М. М. О приоритетных направления научных исследований ОАО «ВНИИЖТ» [Текст] / М. М. Железнов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2013. – №6. – С. 28-33.

102. Железнов, М. М. О создании виртуального исследовательского и испытательного полигона железнодорожного пути [Текст] / М. М. Железнов, С. С. Каплин // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития: сб. трудов молодых ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричани. – М.: Интекст, 2013. – С. 219-222.

103. Железнов, М. М. Оперативное дистанционное зондирование железнодорожных объектов из космоса [Текст] / М. М. Железнов, А. Ю. Макаров, В. А. Смородинский // Применение геоинформационных и спутниковых радионавигационных систем на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов. Выпуск 1001. – М.: МИИТ. – 2005. – С. 33.

104. Железнов, М. М. Оперативный мониторинг потенциально опасного взаимодействия железной дороги с окружающей средой [Текст] / М. М. Железнов, С. Ю. Завьялов // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития: сб. трудов молодых ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричани. – М.: Интекст, 2013. – С. 214-218.



105. Железнов, М. М. Описание экспериментальных исследований ОАО «ВНИИЖТ» в формате математического моделирования [Текст] / М. М. Железнов, С. С. Каплин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2014. – Том 1. – С. 551-553.

106. Железнов, М. М. Определение геометрических параметров железнодорожного пути по материалам аэрокосмического дистанционного зондирования [Текст] / М. М. Железнов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2011. – №6. – С. 3-6.

107. Железнов, М. М. Оптико-физические исследования в ИКИ РАН [Текст] / М. М. Железнов // Сборник тезисов III Конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С. 45.

108. Железнов, М. М. Основные направления исследований в области мониторинга и технического обслуживания железнодорожного пути на основе спутниковых технологий [Текст] / М. М. Железнов // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – №6. – С. 59-64.

109. Железнов, М. М. Основные этапы развития научного знания и высоких технологий в путевом комплексе. Инновационный трансферт в инфраструктуру железнодорожного транспорта [Текст] / М. М. Железнов // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта: сб. тр. Членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / Под ред. Б. М. Лapidуса. – М.: Интекст, 2013. – С. 176-184.

110. Железнов, М. М. Перспективы и эффективность использования спутниковых радионавигационных систем на транспорте [Текст] / М. М. Железнов // Безопасность движения поездов: труды третьей научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2002. – С. V-80 - V-81.

111. Железнов, М. М. Поиск оптимального положения трассы железнодорожного пути в плане с применением геометрического моделирования [Текст] / М. М. Железнов, Е. А. Сидорова // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – №1. – С. 35-39.

112. Железнов, М. М. Предотвращение чрезвычайных ситуаций путем выявления объемных деформаций на потенциально-опасных участках железнодорожного пути с использованием аэрокосмической съемки [Текст] / М. М. Железнов, В. М. Пономарев, В. О. Певзнер // Наука и техника транспорту. – 2017. – №4. – С. 24-31.

113. Железнов, М. М. Развитие и внедрение инновационных технологий в информационно-технологическую систему технического обслуживания железнодорожного пути [Текст] / М. М. Железнов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – №6. – С. 1-5.

114. Железнов, М. М. Система координат для решения задач мониторинга и технического обслуживания железнодорожного пути [Текст] / М. М. Железнов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – №1. – С. 4-8.

115. Железнов, М. М. Способ создание цифровых моделей железнодорожных путей по оцифрованным материалам маршрутной аэросъемки [Текст] / М. М. Железнов, А. Ю. Макаров, В. А. Смородинский // Применение геоинформационных и спутниковых радионавигационных систем на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов. Выпуск 1001. – М.: МИИТ. –2005. – С. 28-32.

116. Железнов, М. М. Спутниковая навигация транспортных средств с использованием ЦМП [Текст] / М. М. Железнов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев // Транссибирская магистраль на рубеже XX-XXI веков: Труды международной научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2003. – С. Va-4.

117. Железнов, М. М. Спутниковая навигация транспортных средств с использованием цифровых моделей железной дороги: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.35 / Железнов Максим Максимович. – М., 2002. – 152 с..

118. Железнов, М. М. Спутниковая навигация транспортных средств с использованием цифровых моделей железной дороги: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.35 / Железнов Максим Максимович. – М., 2002. – 24 с.

119. Железнов, М. М. Спутниковый мониторинг потенциально-опасных участков железнодорожного пути [Текст] / М. М. Железнов, Н. В. Сазонов, А. С.

Василейский // Труды 4-й международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения». – М.: Информационное агенство «ГРОМ». – 2008. – С. 54-56.

120. Железнов, М. М. Спутниковый радиолокационный мониторинг объектов железнодорожной инфраструктуры [Текст] / М. М. Железнов, И. Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – №1. – С. 2-3.

121. Железнов, М. М. Стенд для отработки телевизионной системы навигации и наведения проекта "Фобос-Грунт" [Текст] / Железнов М. М., Кондратьева Т. В., Шашурин Р. М. // Сборник докладов выездного семинара под редакцией Р.Р.Назирова. – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С. 28.

122. Железнов, М. М. Стенд отработки телевизионной системы навигации и наведения проекта "Фобос-Грунт" [Текст] / М. М. Железнов, Р. М. Шашурин // Материалы конференции «Исследования космического пространства в интересах фундаментальных наук». – М.: ИКИ РАН. – 2005. – С. 34.

123. Железнов, М. М. Телевизионная поддержка посадки КА "Фобос-Грунт" [Текст] / М. М. Железнов // Материалы конференции «Исследования космического пространства в интересах фундаментальных наук». – М.: ИКИ РАН. – 2005. – С. 33.

124. Жуков, Б. С. Задачи обработки многозональных видеоданных КМСС на КА «Метеор-М» [Текст] / Жуков Б. С., Василейский А. С., Железнов М. М., Жуков С. Б., Бекренев О. В., Пермитина Л. И. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Том I. – С. 210-215.

125. Жуков, Б. С. Задачи обработки многозональных видеоданных КМСС на КА «Метеор-М» [Текст] / Б. С. Жуков, А. С. Василейский, М. М. Железнов, С. Б. Жуков, О. В. Бекренев, Л. И. Пермитина // Материалы 4-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.85.

126. Завьялов С. Ю. Класс опасности водных объектов для дорожного полотна [Текст] / С. Ю. Завьялов // Мир транспорта. – 2016. – № 2. –С. 168-177.

127. Завьялов С. Ю. Сравнительная оценка методов мониторинга водных объектов, потенциально опасных для железнодорожного пути [Текст] / С. Ю. Завьялов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 2. – С. 97-101.
128. Инструкция по содержанию земляного полотна железнодорожного пути / МПС России. – М.: Транспорт. – 2000. – 189 с.
129. Конаков, В. П. Комплексная оценка пути и сооружений [Текст] / В. П. Конаков, В. О. Певзнер // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 12. – С. 6-7.
130. Конаков, В. П. Комплексная оценка состояния пути [Текст] / В.П. Конаков, В. О. Певзнер, И. Б. Петропавловская, Т. И. Громова [Текст] / Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 3. – С. 64-67.
131. Косарев, А. Б. О нормативно-техническом обеспечении диагностики и мониторинга объектов путевой инфраструктуры [Текст] / А. Б. Косарев, А. В. Макаров, Б. Н. Зензинов, В. О. Певзнер // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 28-29.
132. Коугия В.А. Алгоритм пересчета географических координат объектов местности, прилегающей к железнодорожному полотну, в координаты картографической проекции [Текст] / В. А. Коугия, С. И. Матвеев, М. М. Железнов // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: труды IV научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2005. – С. VIII-15 - VIII-16.
133. Круглов, В. М. Аппаратно-программный комплекс измерения геометрических параметров рельсовой колеи железнодорожного пути [Текст] / В. М. Круглов, Д. С. Манойло, М. М. Железнов, А. А. Сабирзянов // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2004. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2004. – С. 101-102.
134. Круглов, В. М. Геоинформационные и спутниковые технологии как средство безопасности железнодорожного транспорта России [Текст] / В. М. Круглов, С. И. Матвеев, Б. Н. Зензинов, М. М. Железнов, А. С. Матвеев, Д. С. Манойло // Безопасность движения поездов: труды IV научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2003. – С. III-24.

135. Крупин, М. А. Исследование точности бортовой аппаратуры спутниковой навигации для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли [Текст] / М. А. Крупин, А. С. Василейский, М. М. Железнов // Материалы 4-й открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.260.

136. Куссуль, Н. Н. Нейросетевой метод мониторинга затопленных территорий с использованием радиолокационных спутниковых данных [Текст] / Н. Н. Куссуль, Е. А. Лупян, А. Ю. Шелестов, С. В. Скакун, В. П. Саворский, Ю. Г. Тищенко // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 4. –С. 29-35.

137. Лёвин, Б. А. Кибернетические технологии содержания и управления железнодорожным транспортом [Текст] / Б. А. Лёвин, В. М. Круглов, С. И. Матвеев, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев, М. М. Железнов // Применение геоинформационных и спутниковых радионавигационных систем на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов. Выпуск 1001. – М.: МИИТ. –2005. – С. 3-5.

138. Лёвин, Б. А. Кибернетические технологии содержания и управления железнодорожным транспортом [Текст] / Б. А. Лёвин, В. М. Круглов, С. И. Матвеев, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев // Проблемы геоинформатики и спутниковой навигации железнодорожного транспорта: труды международной научно-технической конференции. – М.: МИИТ. – 2007. – С.31-34.

139. Лёвин, Б. А. Комплексный мониторинг транспортной инфраструктуры [Текст] / Б. А. Лёвин // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 1. – С. 14-21.

140. Лёвин, Б. А. Успехи научно-образовательного центра "геоинформационные и спутниковые технологии железнодорожного транспорта" (МИИТ-НИИАС) в обеспечении безопасности движения поездов [Текст] / Б. А. Лёвин, С. И. Матвеев, М. М. Железнов, И. Н. Розенберг // Безопасность движения поездов: труды четырнадцатой научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2013. – С. 69-70.

141. Лупян, Е. А. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга [Текст] / Е. А. Лупян, И. В. Балашов, М. А.

Бурцев, В. Ю. Ефремов, А. В. Кашницкий, Д. А. Кобец, Ю. С. Крашенинникова, А. А. Мазуров, Р. Р. Назиров, А. А. Прошин, И. Г. Сычугов, В. А. Толпин, И. А. Уваров, Е. В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – № 5. – С. 53-75.

142. Манойло, Д. С. Высокоточная цифровая модель железнодорожной магистрали "Москва - Санкт-Петербург" (пилот-проект) [Текст] / Д. С. Манойло, М. М. Железнов, Д. С. Юдин, С. И. Матвеев // Труды научно-практической конференции Неделя науки - 2005 "Наука - транспорту". – М.: МИИТ. – 2005. – С. XII-7.

143. Мартынюк, И. В. О разработке принципов и методов прогнозной оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте [Текст] / И. В. Мартынюк // Наука и техника транспорта. – 2006. – № 3. – С. 23-29.

144. Мартынюк, И. В. О разработке принципов и методов прогнозной оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте [Текст] / И. В. Мартынюк // Наука и техника транспорта. – 2006. – № 4. – С. 52-58.

145. Матвеев С. И. Эталонный полигон для исследования измерительных кибернетических систем железнодорожного транспорта на экспериментальном кольце ВНИИЖТа [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, А. А. Батраков, А. А. Сабирзянов // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2004. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2004. – С.111-112.

146. Матвеев, А. С. Измерительная кибернетическая система создания высокоточных цифровых моделей железнодорожного пути [Текст] / А. С. Матвеев, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, С. Ю. Юдин // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2004. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2004. – С.106-107.

147. Матвеев, С. И. Автомобильный видеограмметрический комплекс контроля состояния автодорожного полотна [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, А. А. Сабирзянов, Р. В. Павлов // Всероссийская выставка научно-технического

творчества молодежи НТТМ-2005. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2005. – С. 38.

148. Матвеев, С. И. В будущее по экспериментальному кольцу [Текст] / С. И. Матвеев, А. А. Еремушкин, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев // Геодезистъ. – 2002. – №5-6. – С. 18-20.

149. Матвеев, С. И. Высокоточная цифровая модель железнодорожной магистрали "Москва - Санкт-Петербург" (Пилот-проект) [Текст] / С. И. Матвеев, Д. С. Манойло, М. М. Железнов, С. Ю. Юдин // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2005. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2005. – С. 39.

150. Матвеев, С. И. Высокоточные цифровые модели железных дорог России (Пилот-проект) [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, С. Ю. Юдин // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2004. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2004. – С.104-106.

151. Матвеев, С. И. Геодезический видеограмметрический комплекс [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, А. А. Сабирзянов, Р. В. Павлов // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2005 . Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2005. – С. 39.

152. Матвеев, С. И. ГИС как новые системы менеджмента [Текст] / С. И. Матвеев, В. Я. Цветков, М. М. Железнов // Современные проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте: труды международной научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2001. – С. V-8 - V-9.

153. Матвеев, С. И. Железнодорожный видеограмметрический комплекс создания цифровых моделей местности и объектов вдоль железнодорожной магистрали [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, С. Ю. Юдин // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2005. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2005. – С. 39-40.

154. Матвеев, С. И. Моделирование траекторного движения спутников при оперативном дистанционном зондировании железнодорожных магистралей [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, А. Ю. Макаров, В. В. Соколюк // Все-

русская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2005. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2005. – С.40.

155. Матвеев, С. И. Положение об объединенном научно-исследовательском и испытательном центре «Геоинформационные и спутниковые технологии железнодорожного транспорта» МИИТ [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов // Проблемы геоинформатики и спутниковой навигации железнодорожного транспорта: труды международной научно-технической конференции. – М.: ИКИ РАН. – 2006. – С.13-14.

156. Матвеев, С. И. Создание высокоточной цифровой модели железнодорожного пути и привязки показаний путеизмерительного устройства к реперной сети [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев, Е. Н. Савенков // Транссибирская магистраль на рубеже XX-XXI веков: труды международной научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2003. – С. Va-8 – Va-9.

157. Матвеев, С. И. Создание цифровой модели пути экспериментального железнодорожного кольца ВНИИЖТа [Текст] / С. И. Матвеев, У. Д. Ниязгулов, М. М. Железнов, Д. С. Манойло // Проблемы геоинформатики и спутниковой навигации железнодорожного транспорта. Труды Международной научно-технической конференции. – М.: МИИТ. – 2007. – С. 39-40.

158. Матвеев, С. И. Способ контроля состояния железнодорожного пути / С. И. Матвеев, В. А. Коугия, Д. С. Манойло, М. М. Железнов // Патент Российской Федерации на изобретение, рег. № 2226672 от 06.06.2002. – М.: Роспатент, 2002.

159. Матвеев, С. И. Спутниковая навигационная система для железнодорожного транспорта [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов // Безопасность движения поездов: труды третьей научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2001. – С.V-83.

160. Матвеев, С. И. Технологии цифрового моделирования объектов железнодорожного транспорта [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, Б. Н. Зензинов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев // Применение геоинформационных и спутни-



ковых радионавигационных систем на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов. Выпуск 1001. – М.: МИИТ. –2005. – С. 5.

161. Матвеев, С. И. Экспериментальная цифровая фотограмметрическая система создания цифровых моделей железнодорожных путей по материалам маршрутной аэросъемки [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, А. Ю. Макаров, В. В. Соколюк // Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2004. Сборник материалов. – М.: ОАО «ГАО ВВЦ». – 2004. – С.110-111.

162. Матвеев, С. И. Эталонирование путеизмерительных устройств, выправочных машин и механизмов на экспериментальном кольце ВНИИЖТа [Текст] / С. И. Матвеев, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев // Безопасность движения поездов: труды IV научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2003. – С. III-31.

163. Махутов Н. А. Критерии и показатели рисков чрезвычайных ситуаций в оценках национальной безопасности [Текст] / Н. А. Махутов // Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий: труды XX международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М.:ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – 2015. – С. 44-54:

164. Махутов Н. А. Развитие методов анализа техногенных опасностей и рисков для объектов железнодорожного транспорта [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, А. М. Соколов, Е. Ю. Титов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 6. – С. 3-12.

165. Махутов, Н. А. Анализ и мониторинг опасных состояний объектов техносферы [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Опыт ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций в России и за рубежом: материалы XIX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М.:ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – 2014. – С. 329-345.

166. Махутов, Н. А. Анализ и обеспечение защищенности критически важных объектов ОАО «РЖД» от тяжелых аварий и катастроф [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – № 9. – С. 17-22.

167. Махутов, Н. А. Анализ рисков отказов при функционировании потенциально опасных объектов [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, А. О. Чернявский, М. М. Шатов // Проблемы анализа риска. – 2012. – № 3. – С. 4-21.

168. Махутов, Н. А. Влияние опасных процессов и иницирующих факторов, их взаимодействий на развитие техногенных катастроф [Текст] / Н. А. Махутов, Р. С. Ахметханов, В. П. Петров, Т. Н. Дворецкая // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2008. – № 3. – С. 3-12.

169. Махутов, Н. А. Дорожная карта формирования рынка услуг по комплексной безопасности объектов транспортного комплекса [Текст] / Н. А. Махутов, Л. В. Балановский, В. Л. Балановский, С. П. Габур // Качество и жизнь. – 2014. № 3. – С. 43-52.

170. Махутов, Н. А. Защита объектов железнодорожного транспорта на базе оценки стратегических рисков тяжелых катастроф [Текст] / Н. А. Махутов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2011. – № 2. – С. 3-8.

171. Махутов, Н. А. Комплексный мониторинг и оценка состояния потенциально опасных объектов в России [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, Р. А. Таранов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2010. – № 6. – С. 88-95.

172. Махутов, Н. А. Методика оценки информации при мониторинге состояния объектов с использованием космических средств [Текст] / Н. А. Махутов, Р. А. Таранов // Безопасность в техносфере. – 2007. – № 2. – С. 35-38.

173. Махутов, Н. А. Методика оценки количества и качества информации, необходимой для мониторинга состояния объектов по обогащению урана с использованием космических средств [Текст] / Н. А. Махутов, Р. А. Таранов, С. А. Качанов // Технологии гражданской безопасности. – 2010. – № 3. – С. 10-13.

174. Махутов, Н. А. Методы и моделирование процессов возникновения и развития техногенных катастроф [Текст] / Н. А. Махутов, В. П. Петров, Р. С. Ахметханов, Е. Ф. Дубинин, Т. Н. Дворецкая // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2009. – № 2. – С. 3-23.

175. Махутов, Н. А. Мониторинг рисков и прогнозирование для систем комплексной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств [Текст] / Н. А. Махутов, Л. В. Балановский, В. Л. Балановский, С. П. Габур, И. И. Карabanов // Качество и жизнь. – 2014. – № 3. – С. 11-16.

176. Махутов, Н. А. Научные основы анализа и снижения рисков чрезвычайных ситуаций в районах Сибири и Севера [Текст] / Н. А. Махутов, М. П. Лебедев, А. М. Большаков, М. М. Гаденин // Арктика: экология и экономика. – 2013. – № 4. – С. 4-15.

177. Махутов, Н. А. Некоторые вопросы развития систем упреждающей диагностики [Текст] / Н. А. Махутов, В. П. Петров, Р. С. Ахметханов, Е. Ф. Дубинин, В. И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2010. – № 4. – С. 22-48.

178. Махутов, Н. А. Обобщенные динамические модели возникновения и развития аварий и катастроф [Текст] / Н. А. Махутов, В. П. Петров, Р. С. Ахметханов, Е. Ф. Дубинин, Т. Н. Дворецкая // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2010. – № 4. – С. 57-77.

179. Махутов, Н. А. Основы построения систем мониторинга, диагностики и защиты СТС с учетом возможности террористических воздействий [Текст] / Н. А. Махутов, Р. С. Ахметханов, Е. Ф. Дубинин, В. И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017. – № 1. – С. 63-76.

180. Махутов, Н. А. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций на газопроводах в условиях севера [Текст] / Н. А. Махутов, М. П. Лебедев, А. М. Большаков, М. И. Захарова // Вестник Российской академии наук. – 2017. – Т. 87. – № 9. – С. 858-862.

181. Махутов, Н. А. Особенности обеспечения безопасности критических инфраструктур [Текст] / Н. А. Махутов, Д. О. Резников, В. П. Петров // Безопасность в техносфере. – 2014. – № 1. – С. 3-14.

182. Махутов, Н. А. Особенности поражающих факторов ЧС и их воздействие на системы диагностики КОВ [Текст] / Н. А. Махутов, В. П. Петров, Р. С. Ахметханов, Е. Ф. Дубинин, В. И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2011. – № 5. – С. 25-45.

183. Махутов, Н. А. Постановка, решение и освещение проблем безопасности и чрезвычайных ситуаций [Текст] / Н. А. Махутов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2010. – № 6. – С. 6-10.

184. Махутов, Н. А. Построение научных основ, методов и систем мониторинга рисков природно-техногенных опасностей для объектов железнодорожного транспорта [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 1. – С. 9-26.

185. Махутов, Н. А. Предупреждение техногенных катастроф [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, С. П. Земцов, В. С. Косов, Н. Ф. Красюков, Э. С. Оганьян, Н. И. Малышев, В. И. Мельников // Транспорт: наука, техника, управление. – 2009. № 11. – С. 31-34.

186. Махутов, Н. А. Создание транспортных систем для перевозки опасных грузов на основе анализа рисков возникновения катастрофических состояний и безопасности [Текст] / Н. А. Махутов, В. Л. Балановский, К. М. Любимов // Радиопромышленность. – 2016. – № 3. – С. 87-91.

187. Махутов, Н. А. Стратегические риски в техногенной сфере [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2003. – № 4. – С. 10-10.

188. Махутов, Н. А. Человеческий фактор в системе управления рисками и предупреждения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте [Текст] / Н. А. Махутов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 10. – С. 21-22.

189. Махутов, Н. А. Экологическая безопасность и экологическое наследие в проблемах национальной безопасности [Текст] / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Экология и промышленность России. 2016. – № 3. – С. 47-51.

190. Махутов, Н. А. Экологические риски негативных техногенных воздействий [Текст] / Н. А. Махутов // Экология и промышленность России. – 2011. – № 4. – С. 66-70.

191. Махутов, Н. А. Эффективность мер по снижению опасности при чрезвычайных ситуациях [Текст] / Н. А. Махутов, А. И. Костин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 1997. – № 10. – С. 26-28.

192. Недорчук, Б. Л. Об особенностях функционирования перспективных мониторинговых систем по предупреждению и ликвидации ЧС в регионе действия Северо-Кавказской железной дороги [Текст] / Б. Л. Недорчук, В. Н. Кузьменко, И. В. Мартынюк, О. Н. Попов, Н. С. Флегонтов // Региональные риски чрезвычайных ситуаций и управление природной и техногенной безопасностью муниципальных образований: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Центр стратегических исследований гражданской защиты МЧС России. – М.:ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – 2004. – С. 403-410.

193. Певзнер В. О. Инфраструктура в условиях применения вагонов с повышенными осевыми нагрузками [Текст] / В. О. Певзнер, В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская, И. В. Третьяков, К. В. Шапетько // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 7. – С. 58-61.

194. Певзнер, В. О. Научные основы моделирования взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации [Текст] / В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, М. М. Железнов, С. С. Надежин // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» . – 2014. – №4. – С. 8-14.

195. Певзнер, В. О. О разработке дополнений к нормативной документации по дифференциации скоростей движения пассажирских и грузовых поездов в местах действия предупреждений об ограничении скорости в рамках приоритетного направления «Разработка системы процессного управления безопасностью желез-

нодорожных перевозок (в том числе на основе автоматизированной системы мониторинга состояния подвижного состава и пути), защиты объектов железнодорожного транспорта на базе оценки стратегических рисков тяжелых катастроф» [Текст] / В. О. Певзнер, Ю. С. Ромен // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2011. – № 4. – С. 9-15.

196. Певзнер, В. О. Оценка деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов [Текст] / В. О. Певзнер, С. С. Надежин, А. В. Анисин, И. В. Третьяков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 4. – С. 44-48.

197. Певзнер, В. О. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подшпальных прокладок [Текст] / В. О. Певзнер, М. М. Железнов, В. Н. Каплин, В. В. Третьяков, М. Н. Мысливец, А. С. Томиленко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 3. – С. 140-146.

198. Певзнер, В.О. Принципиальные возможности совершенствования методов оценки состояния железнодорожного пути [Текст] / В.О. Певзнер, С.В. Малинский // Транспорт: наука, техника, управление. – 1991. – № 6. – С. 6-11.

199. Певзнер, В.О. Проблемы контроля состояния пути на современном этапе [Текст] / В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен // Железнодорожный транспорт. – 1994. – № 2. – С. 34.

200. Певзнер, В.О. Стабильность пути должна иметь цену и оценку [Текст] / В.О. Певзнер // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 9. – С. 8-9.

201. Певзнер, В.О. Эффективная система технического обслуживания пути — залог безопасности движения [Текст] / В. О. Певзнер // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 3. – С. 20-21.

202. Пономарёв, В. М. Актуальные вопросы подготовки сил обеспечения транспортной безопасности [Текст] / В. М. Пономарёв, В. А. Ульянов // Проблемы безопасности российского общества. – 2014. – № 3-4. – С. 70-74.

203. Пономарев, В. М. Методы и средства повышения безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Пономарев Валентин Михайлович. – М., 2011. – 416 с.

204. Пономарёв, В. М. Методы и средства повышения безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Пономарев Валентин Михайлович. – М., 2011. – 47 с.

205. Пономарёв, В. М. Модель взаимодействия железнодорожной транспортной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций с функциональными подразделениями ОАО «РЖД» [Текст] / В. М. Пономарёв // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 2. – С. 60-62.

206. Пономарёв, В. М. Обоснование понятий безопасности [Текст] / В.М. Пономарёв // Мир транспорта. – 2008. – № 3. – С. 16-23.

207. Пономарёв, В. М. Оценка состояния устойчивости перевозочного процесса на железнодорожном транспорте в условиях чрезвычайных ситуаций [Текст] / В. М. Пономарёв, А. И. Шевченко, Б. Н. Рахманов // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 3. – С. 5-11.

208. Пономарев, В. М. Повышение безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях: монография / В.М. Пономарев. – М: МИИТ, 2017. – 174 с.

209. Пономарёв, В. М. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте [Текст] / В.М. Пономарёв, А.И. Шевченко // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 2. – С. 40-46.

210. Пономарёв, В. М. Силы чрезвычайного реагирования [Текст] / В. М. Пономарёв, А. И. Шевченко // Мир транспорта. – 2005. – № 3. – С. 114-122.

211. Пономарёв, В. М. Система оперативного поддержания темпов восстановительных работ при ликвидации последствий ЧС на железнодорожном транспорте [Текст] / В. М. Пономарёв // Транспорт Урала. – 2011. – № 3. – С. 32-35.

212. Пономарёв, В. М. Система оперативного управления в условиях чрезвычайных ситуаций [Текст] / В.М. Пономарёв // Наука и техника транспорта. 2011. – № 2. – С. 27-34.
213. Пономарёв, В. М. Совершенствование системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте [Текст] / В. М. Пономарев, А. И. Шевченко // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 3. – С. 8-15.
214. Пономарёв, В. М. О порядке разработки документов, связанных с предупреждением и ликвидацией чрезвычайных ситуаций [Текст] / В. М. Пономарев, А. И. Шевченко // Соискатель - приложение к журналу Мир транспорта. – 2005. – № 1. – С. 30-40.
215. Пучков, В. А. Катастрофы и устойчивое развитие в условиях глобализации [Текст] / В. А. Пучков // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2013. – № 3. – С. 195-208.
216. Пучков, В. А. О долгосрочных перспективах развития системы МЧС России [Текст] / В. А. Пучков // Проблемы анализа риска. – 2013. – № 1. – С. 6-15.
217. Розенберг, И. Н. Возможности использования спутниковых технологий для мониторинга железнодорожной инфраструктуры [Текст] / И. Н. Розенберг, Е. А. Лупян, М. М. Железнов, А. С. Василейский // Ренессанс железных дорог. Фундаментальные научные исследования и прорывные инновации: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – М.: Аналитика Родис, 2015. – С. 97-112.
218. Розенберг, И. Н. Геоинформационный мониторинг транспортных объектов [Текст] / И. Н. Розенберг // Науки о Земле. – 2012. – № 3. – С. 20-25.
219. Розенберг, И. Н. Единая система координатно-временного обеспечения [Текст] / И. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 6. – С.42-43.
220. Розенберг, И. Н. Перспективы развития технологий мониторинга и содержания инфраструктуры транспортных железнодорожных коридоров стран СНГ «Пространства 1520» на основе спутниковых и геоинформационных техно-



логий [Текст] / И. Н. Розенберг, М. М. Железнов // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – №6. – С. 36-39.

221. Розенберг, И. Н. Применение спутниковых и геоинформационных технологий в развитии путевого хозяйства [Текст] / И.Н. Розенберг // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2012. – № 5. – С. 8-20.

222. Розенберг, И. Н. Проекты научно-образовательного центра (НОЦ) "Геоинформационные и спутниковые технологии железнодорожного транспорта" (МИИТ-НИИАС) в обеспечении безопасности движения [Текст] / И. Н. Розенберг, С. И. Матвеев, М. М. Железнов // Безопасность движения поездов: труды IV научно-практической конференции. – М.: МИИТ. – 2010. – С. IX-1.

223. Розенберг, И. Н. Спутниковые и геоинформационные технологии в интеллектуальных системах управления [Текст] / И.Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 3. – С. 28-32.

224. Савенков, Е. Н. Эксперимент по созданию цифровой модели пути экспериментального железнодорожного кольца ВНИИЖТа [Текст] / Е. Н. Савенков, А. А. Еремушкин, С. И. Матвеев, У. Д. Ниязгулов, М. М. Железнов, Д. С. Манойло, А. С. Матвеев, А. А. Батраков, А. Д. Тихонов // Применение геоинформационных и спутниковых радионавигационных систем на железнодорожном транспорте. Сборник научных трудов. Выпуск 1001. – М.: МИИТ. –2005. – С. 27-28.

225. Сидорова Е. А. Исследование показателей динамического взаимодействия пути и подвижного состава с использованием модели отклонений железнодорожного пути [Текст] / Е. А. Сидорова, М. М. Железнов, В. О. Певзнер // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития: сб. трудов молодых ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричиани. – М.: Интекст, 2017. – С. 229-236.

226. Сидорова, Е. А. Виртуальный исследовательский и испытательный полигон железнодорожного пути [Текст] / Е. А. Сидорова, С. С. Каплин, С. Ю. Завьялов, М. М. Железнов // Геодезия, геоинформатика и навигация – XXI век: труды международной конференции. – М.: МИИТ, 2012. – С. 115-116.

227. Сидорова, Е. А. Метод оптимизационного моделирования геометрических параметров трассы протяженных участков железнодорожного пути [Текст] / Е. А. Сидорова, М. М. Железнов // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития: сб. трудов молодых ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. М.М. Железнова, Г. В. Гогричиани. – М.: Интекст, 2013. – С. 208-214.

228. Сидорова, Е. А. Метод оптимизационного моделирования геометрических параметров трассы протяженных участков пути [Текст] / Е. А. Сидорова, М. М. Железнов // Геодезия, геоинформатика и навигация – XXI век: труды международной конференции. – М.: МИИТ, 2012. – С. 118-120.

229. Смородинский, В. А. Возможности применения методов искусственного интеллекта при управлении корпоративным имуществом ОАО «РЖД» [Текст] / В. А. Смородинский, М. М. Железнов // Вестник МИИТа. – М.: МИИТ. – вып.5. – 2005. – С. 64-65.

230. Соловьев, В. П. Численное моделирование процесса накопления деформаций пути в вертикальной плоскости с использованием метода частиц для различных условий эксплуатации [Текст] / В. П. Соловьев, А. В. Анисин, И. А. Давыдов, С. С. Надежин, В. О. Певзнер, М. М. Железнов, В. В. Третьяков, И. В. Третьяков // Ренессанс железных дорог. Фундаментальные научные исследования и прорывные инновации: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – М.: Аналитика Родис, 2015. – С. 61-74.

231. Титова, Т. С. Разработка методических основ определения и оценки состояния потенциально-опасных объектов [Текст] / Т. С. Титова, Р. Г. Ахтямов, Г. А. Бухарбаева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 342.

232. Третьяков, В. В. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой [Текст] / В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская, В. О. Певзнер, Т. И. Громова, И. В. Третьяков, К. В. Шапетько, И. С. Смелянская, А. С. Томиленко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 4. – С. 233-238.

233. Уманский, В. И. Автоматизация сбора и обработки пространственных данных железнодорожной инфраструктуры [Текст] / В. И. Уманский, С. К. Дулин, С. В. Трусов, Д. А. Якушев // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 10. – С. 46-49.

234. Федоров, В. А. Дистанционный радиолокационный комплекс мониторинга и оперативной диагностики [Текст] / В. А. Федоров, С. М. Каплунов, Н. А. Махутов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 1998. – № 7. – С. 52-59.

235. Филиппов, В. Н. Обеспечение безопасности перевозки опасных грузов [Текст] / В. Н. Филиппов // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 3. – С. 37-43.

236. Флегонтов, Н. С. Снижение рисков чрезвычайных ситуаций техногенного характера - стратегическое научно-техническое направление на федеральном железнодорожном транспорте [Текст] / Н. С. Флегонтов, И. В. Мартынюк, О. Н. Попов, Б. Л. Недорчук // Региональные риски чрезвычайных ситуаций и управление природной и техногенной безопасностью муниципальных образований: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Центр стратегических исследований гражданской защиты МЧС России. – М.:ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – 2003. – С. 247-252.

237. Шахраманьян М. А. Концептуальные основы государственной стратегии снижения рисков и смягчения последствий ЧС: цели, задачи и принципы [Текст] / М. А. Шахраманьян, С. Г. Харченко, А. А. Прохожев, Н. А. Махутов, В. А. Акимов // Экология и промышленность России. – 1997. – № 11. – С. 36-41.

238. Шойгу, С. К. Исторические аспекты развития системы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций [Текст] / С. К. Шойгу // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2013. – № 1. – С. 304-322.

239. Шойгу, С. К. Стратегические цели МЧС России [Текст] / С. К. Шойгу // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – № 2. – С. 9-10.

240. Шульгин, Д. И. Инженерная геология для строителей железных дорог: монография / Д. И. Шульгин, В. Г. Гладков, А. Н. Никулин, В. А. Подвербный. – М: Желдориздат, 2002. – 514 с.

241. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех: монография / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. –М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

## Приложение - справки о внедрении результатов



Акционерное общество  
**«Научно-исследовательский и проектно-конструкторский  
 институт информатизации, автоматизации и связи  
 на железнодорожном транспорте»**

АО «НИИАС»

ул. Нижегородская, 27, стр.1, Москва, Россия, 109029; тел. (499) 262-5320, факс (499) 262-7443; e-mail: info@vniias.ru  
 ОКПО 82462078; ОГРН 1077758841555; ИНН/КПП 7709752846/770901001

20.11.17. № 8412

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА

О практическом использовании результатов диссертации Железнова Максима Максимовича на тему «Методы повышения безопасности движения и предупреждения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте с использованием средств аэрокосмического мониторинга» представляемой на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Созданная модель многоуровневой системы мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) путем интеграции в единый технологический комплекс аэрокосмических и традиционных технологий была принята к реализации для задач мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути внедрена на участке Адлер-Туапсе Северокавказской железной дороги в рамках выполнения работы плана НТР ОАО «РЖД» №19.5.011.Н «Разработка спутниковой технологии мониторинга потенциально-опасных участков ж.д. пути (оползни, скально-обвальные участки и т.д.) в рамках реализации международного научно-технического сотрудничества между ОАО «РЖД» и корпорацией «Финмекканика (Телеспацио).

Получен патент Российской Федерации на полезную модель № 2009115803/22 от 27.04.2009 «Система контроля потенциально-опасных участков железнодорожного пути с использованием данных дистанционного зондирования Земли».

Разработанная технологическая схема и комплексная система аэрокосмического мониторинга и предотвращения ЧС апробирована и внедрена в рамках комплексного научно-технического проекта «Создание современных систем управления движением поездов и обеспечение безопасности движения

(КНП-5)» Раздел 4 Пункт 4.10 «Разработка опытного образца системы и технологии мониторинга железных дорог на основе спутниковых технологий и геоинформационной базы данных (ГБД) по опасным природно-техногенным участкам на полигоне Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги и подтверждены патентом Российской Федерации на полезную модель № 2010116956/09 от 29.04.2010 «Система мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути».

По результатам внедрения определено, что предложенные методы мониторинга потенциально-опасных участков железнодорожного пути с использованием космической радиолокационной съемки являются эффективными высокоточными средствами для предотвращения и предупреждения ЧС. В частности, определенная величина средней скорости вертикальной деформации участка железной дороги Сочи-Дагомыс (пос. Мамайка) составляет 6,9 мм/год.

Опытный образец системы и технологии мониторинга железных дорог на основе спутниковых технологий и геоинформационной базы данных (ГБД) по опасным природно-техногенным участкам на полигоне Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги введен в эксплуатацию в Дорожном центре диагностики пути (инженерно-геологическая база, ст. Сочи).

По результатам работы был сформирован уточненный перечень необходимых объемов работ по ремонту, усилению и реконструкции сооружений на неустойчивых местах земляного полотна железнодорожной линии участка реализации пилотного проекта, а также схема неотложных мероприятий на линии Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги.

Заместитель Генерального директора,  
доктор технических наук

  
  
В.И. Уманский



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
 ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»**  
 (АО «ВНИИЖТ»)

3-я Мытищинская ул., 10, г. Москва, 129626  
 тел.: +7 (495) 687-6555, +7 (495) 687-6456,  
 факс: +7 (499) 262-0070  
 e-mail: press@vniizht.ru, www.vniizht.ru

«21» 11.2017 г. № 104-06/16

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА

О практическом использовании результатов диссертации Железнова Максима Максимовича на тему «Методы повышения безопасности движения и предупреждения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте с использованием средств аэрокосмического мониторинга» представляемой на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт).

Комплексная система мониторинга и предупреждения ЧС и ее технологических элементов апробирована и внедрена на полигонах интенсификации перевозочного процесса. Проведенные наблюдения и результаты исследований состояния железнодорожного пути при введении повышенных осевых нагрузок на экспериментальном полигоне Ковдор-Мурманск с применением методов глобального аэрокосмического мониторинга (работа плана НТР ОАО «РЖД»): «Оценка влияния применения в эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 тс на базе определения напряженно-деформативного состояния верхнего строения пути и земляного полотна при воздействии поездов с вагонами с осевой нагрузкой 23,5 тс, 25 тс и 27 тс и интенсивности расстройств пути в эксплуатации от воздействия поездов с вагонами с нагрузкой 27 тс на ось») позволили сделать следующие выводы:

А) Увеличение осевых нагрузок приводит к росту деформаций пути и риску возникновения ЧС, особенно на увлажненных грунтах (выявлено путем совместного анализа данных космического мониторинга прилегающих территорий и осадок пути);

Б) Обращение вагонов с повышенными осевыми нагрузками целесообразно осуществлять на замкнутых маршрутах в специализированных вертушках для возможности периодического анализа состояния пути и прилегающих территорий по материалам данных дистанционного зондирования.

В) Предложенная технологическая схема мониторинга с использованием аэрокосмических технологий позволит охватывать измерениями весь полигон и оперативно отслеживать изменения состояния пути и прилегающих территорий, выявлять очаги зарождения ЧС - объемные деформации, имеющие протяженный характер и фактически меняющие геометрию пути всего участка.

Заместитель Генерального  
директора АО «ВНИИЖТ»,  
доктор технических наук, профессор



С.Е. Ададуров

*Подпись Ададурова С.Е. заверено*

Начальник отдела управления  
персоналом АО «ВНИИЖТ»,  
Даничева Н.А.








**ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ  
ОАО «РЖД»**

3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва, 129626  
тел.: +7 (499) 260-4243, факс: +7 (499) 260-4296  
e-mail: ous@vnlizht.ru, www.rzd.ru

«20» ноября 2017 г. № ОУС-05/201  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**СПРАВКА**

О практическом использовании результатов диссертации Железнова Максима Максимовича на тему «Методы повышения безопасности движения и предупреждения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте с использованием средств аэрокосмического мониторинга» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт).

В рамках выполнения комплексной работы в интересах ОАО «РЖД» «Обеспечение научного обоснования и оценка хода реализации программ и проектов инновационного развития ОАО «РЖД», а также аналитическая обработка научной информации и документации по комплексным научно-техническим и инновационным проектам ОАО «РЖД» 2010-2017гг. (раздел «Мониторинг макротерриториальных деформаций железнодорожного пути с использованием космических технологий») автором сформированы и одобрены Объединенным ученым советом ОАО «РЖД» основные области применения данных дистанционного зондирования для мониторинга железнодорожной инфраструктуры и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС):

1. Информационное сопровождение на начальной стадии изыскания и проектирования для комплексных инфраструктурных проектов, в том числе для реализации мегапроекта «Транс-Евразийский пояс RAZVITIE» (ТЕПР);
2. Мониторинг ландшафтных изменений, выявление потенциально-опасных участков;

2

3. Мониторинг известных потенциально-опасных участков (прибрежные, горно-перевальные, на неустойчивых грунтах), определенных в перечне управления пути;

4. Отслеживание развития чрезвычайных ситуаций (паводки, наводнения, пожары), в первую очередь, на территориях, предрасположенных к циклическому повторению ЧС.

Первый заместитель  
председателя Объединенного  
ученого совета ОАО «РЖД»,  
д.э.н., профессор

  
Д.А. Мачерет

*Копия Мачерета Д.А.  
заверено: В.С.М. МС  
И.И. Мачерет*

