

Мониторинг – это система постоянного наблюдения за явлениями и процессами, проходящими в окружающей среде и обществе, результаты которого служат для обоснования управленческих решений по обеспечению безопасности людей и объектов экономики. В рамках системы наблюдения происходит оценка, контроль объекта, управление состоянием объекта в зависимости от воздействия определённых факторов. Дистанционный мониторинг предполагает наличие значительного расстояния между наблюдаемыми процессами и устройствами регистрации, что накладывает дополнительные требования на чувствительность и пространственное разрешение сенсоров, возможность их размещения на борту транспортного средства, космического или летательного аппаратов. Эффективность и устойчивость современной экономики в существенной степени определяется цифровыми подходами, основанными на использовании данных оперативного дистанционного мониторинга природной и техногенной среды. Для этого необходимо создать оптико-цифровые системы мониторинга и информационные технологии для удобного и эффективного применения получаемых данных. Результатам решения этой задачи посвящена настоящая работа, относящаяся к приоритетному направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

На рисунке 1 представлен механизм регистрации гиперспектральных изображений, в ходе которого вместо цветного или панхроматического изображений формируется гиперкуб данных (то есть для каждой из десятков или сотен регистрируемых длин волн формируется свое полутонное изображение, комплекс которых образует гиперкуб).

Разработано семейство мультиспектральных систем дистанционного мониторинга природной и техногенной среды, основанное на получении и автоматизированной тематической обработке потоков больших данных с применением методов и средств искусственного интеллекта. Для эффективного и широкого применения семейства разработаны математические модели, численные методы, алгоритмы, программное обеспечение, технология построения информационных систем ди-

станционного мониторинга и освоены серийный выпуск ряда компактных изображающих гиперспектрометров с низким энергопотреблением: для малых космических аппаратов (весом 5 кг, 25 Вт, 250 спектральных каналов, рисунок 2), для наноспутников (весом 1,6 кг, 25 Вт, 250 спектральных каналов), для малых беспилотных летательных аппаратов (весом 400 г, 40 спектральных каналов), а также для размещения на транспорте, поворотных платформах, робототехнических системах, испытательных стендах, поливальных машинах и разнообразной сельскохозяйственной технике.

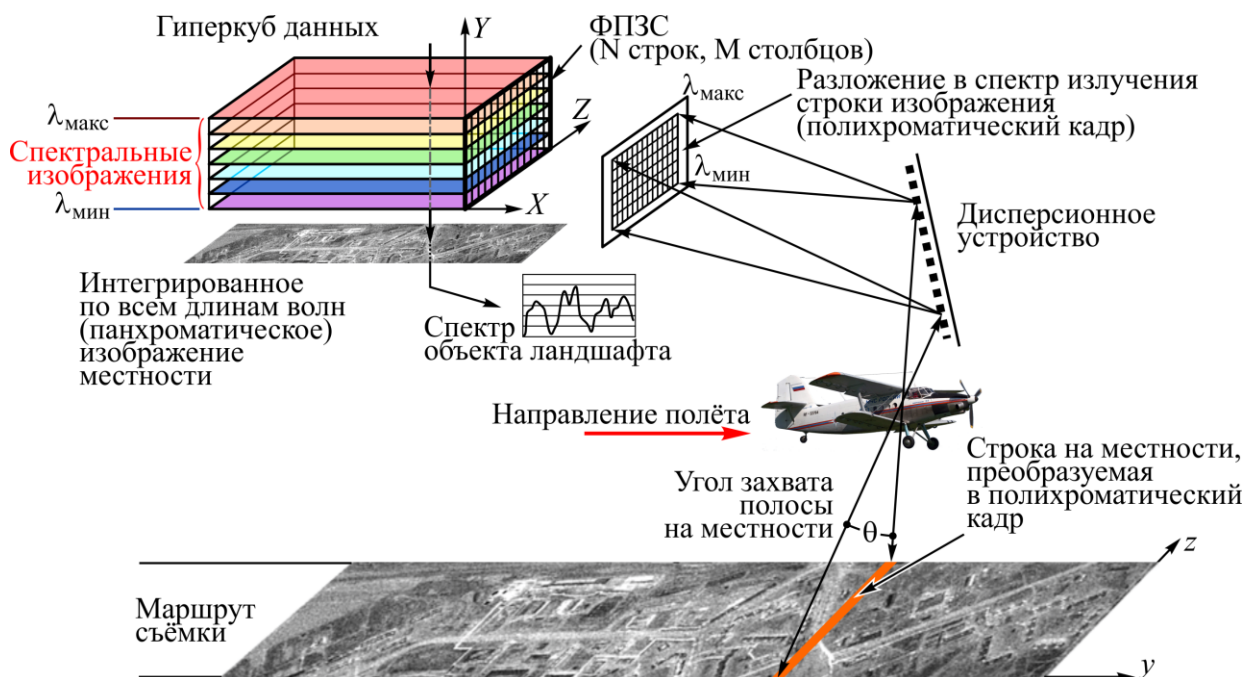


Рисунок 1 – Схема регистрации гиперспектральных изображений с летательного аппарата для формирования гиперкуба данных



Рисунок 2 – Гиперспектрометр для малого космического аппарата

На рисунке 3 приведен пример работы гиперспектральной камеры наноспутника «ИСОИ» формата Кубсат3U, выведенного на орбиту 9.08.2022 г. Полученный гиперкуб данных был использован для создания цветосинтезированного изображения по каналам 500 нм, 550 нм и 600 нм (рисунок 3а), а также для расчёта индексов

NDVI (показывает количество зелёной массы – рисунок 3б), водного индекса WI (показывает относительную влажность зелёной массы – рисунок 3в), антоцианового отражательного индекса растительности ARI (определяет стресс растительности – рисунок 3г). Данные 8-канального спутника Европейского космического агентства Sentinel-2 L2A не позволяют рассчитать вегетационные индексы, хотя и имеют большее пространственное разрешение.

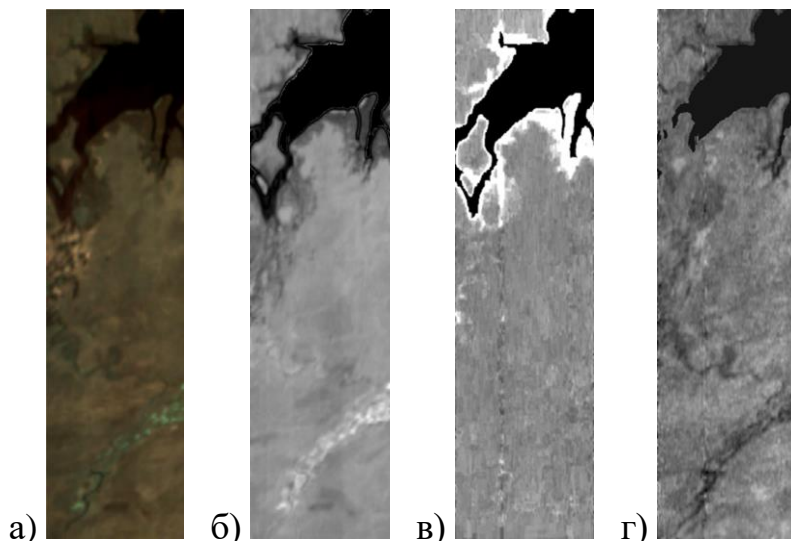


Рисунок 3 - Гиперспектральные съёмки участка северной Австралии: цветосинтезированное изображение (а), распределение индекса NDVI (б), распределение водного индекса WI (в), распределения антоцианового отражательного индекса растительности ARI (г)

Разработаны, изготовлены и прошли наземную отработку радиолокаторы с синтезированной апертурой «Стриж», которые выведены на околоземную орбиту аппаратом 14Ф133 и предназначены для решения широкого круга задач: сбор данных для картографии, землепользования, мониторинг растительных покровов и чрезвычайных ситуаций, обеспечение судовождения. Разработаны алгоритмы и бортовое программное обеспечение синтезирования высокодетальных радиолокационных изображений в режиме реального времени для многочастотного авиационного радиолокационного комплекса дистанционного мониторинга земной и морской поверхности (рисунок 4); обоснован облик интерферометрических авиационных двухканальных радиолокаторов с синтезированной апертурой, разработаны и внедрены алгоритмы обработки интерферометрической радиолокационной информации, которые позволили существенно повысить точность формирования трехмерных цифровых карт рельефа местности; разработаны принципиально новые ал-

горитмы синтезирования и автофокусировки высокодетальных радиолокационных изображений, полученных авиационными радиолокаторами, с разрешающей способностью по координатам дальность, азимут близких к теоретическому пределу ( $1 - 2$  длины волны радиосигнала).

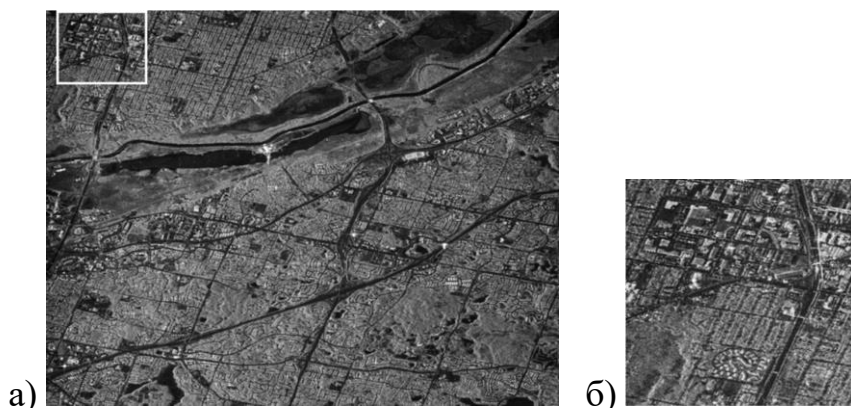


Рисунок 4 – Радиолокационное изображение части штата Миннесота (США), полученное 15.02.2015 космическим аппаратом с радиолокатором «Стриж»: г. Сент-Пол и его окрестности (а); центр г. Сент-Пол с увеличением (б)

Разработан, изготовлен и принят в эксплуатацию четырёхчастотный сканирующий комплекс СВЧ-радиометров для дистанционного зондирования Земли методами СВЧ-радиометрии, который нашёл широкое применение в сельском хозяйстве, мелиорации, гидрологии, океанологии, экологии. Разработана серия портативных СВЧ-радиометров, размещаемых на автомобилях, квадроциклах, квадрокоптерах, для решения задач мониторинга водоопасных ситуаций: подтопления, протечки дамб и гидросооружений, эрозии железнодорожных призм. На рисунке 5 представлен процесс исследования состояния дамб с помощью портативного радиометра «Ранет», позволяющего выявить зоны утечек.

Разработаны технологии, обеспечивающие возможность создания и эффективной поддержки специализированных информационных систем дистанционного мониторинга. В том числе: технология автоматизированного ведения сверхбольших, постоянно пополняющихся, архивов дистанционных наблюдений и результатов их обработки; технологии организации полностью автоматической потоковой и распределенной обработки данных дистанционных наблюдений и информации, получаемой на их основе. На основе разработанных технологий создан центр коллективного пользования мирового уровня Института космических исследований РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг», <http://ckp.geosmis.ru/> – рисунок б), позволяющий распре-

делённым коллективам ученых и специалистов, работающих в области развития и использования современных методов дистанционного зондирования Земли, оперативно получать, обрабатывать и анализировать информацию, накопленную и постоянно поступающую в имеющиеся архивы центра. В ЦКП «ИКИ-Мониторинг» обеспечена оперативная передача больших мультиспектральных данных, получаемых (в том числе с помощью разработанных устройств) организациями членов авторского коллектива. Пользователями ЦКП «ИКИ-Мониторинг» сегодня являются более 120 российских и зарубежных организаций, а также несколько десятков специализированных российских информационных систем дистанционного мониторинга.



Рисунок 5 – Исследования дамб в Нидерландах с помощью портативных радиометров «Ранет»

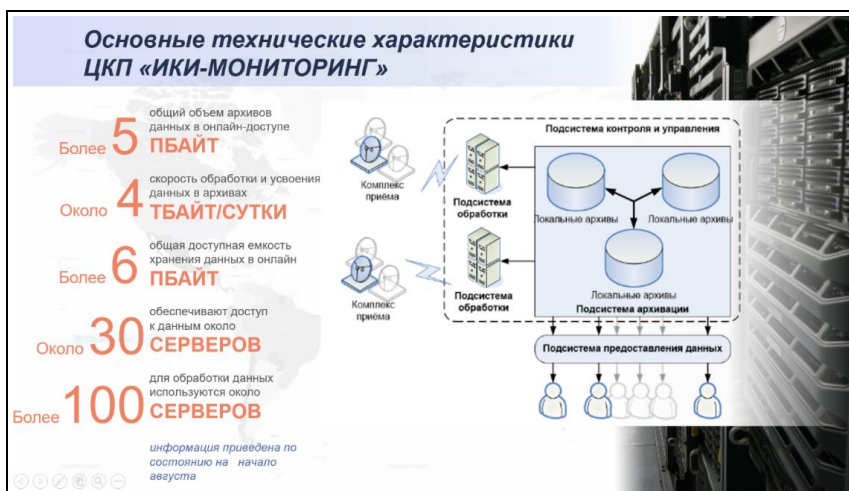


Рисунок 6 – Основные технические возможности ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

На основе разработанных технологий и возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» созданы и поддерживаются несколько десятков специализированных геоинформационных систем дистанционного мониторинга, многие из которых имеют уже более чем 10-летний срок эксплуатации. Многие из созданных и эксплуатиру-

ющихся систем дистанционного мониторинга являются самыми крупными в мире в своем классе. В первую очередь к таким системам следует отнести:

- информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз);
- уникальную научную установку Vega-Science (рисунок 7), входящую в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг»;

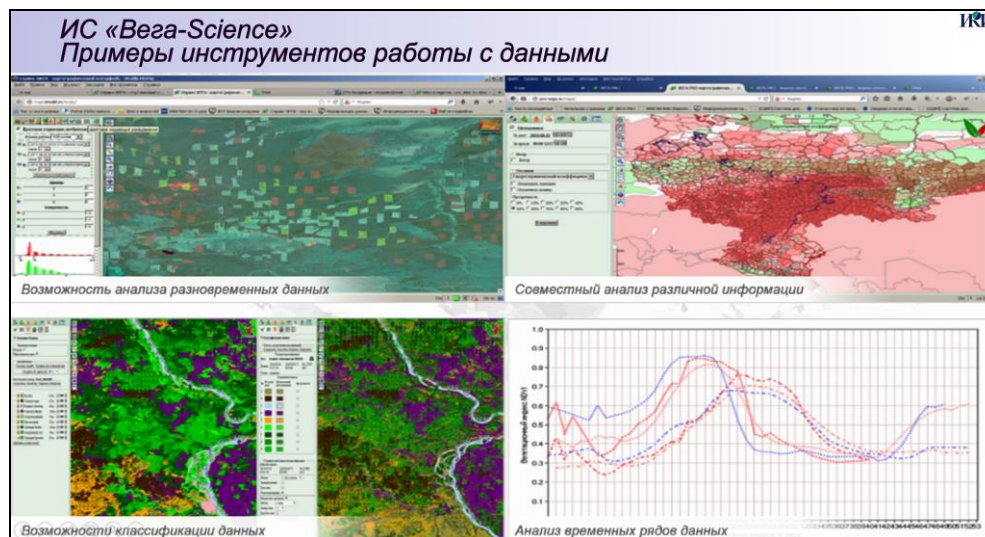


Рисунок 7 – Примеры Web-интерфейсов обработки и анализа данных

- информационную систему Vega-pro, основной задачей которой является геоинформационное обеспечение работ по мониторингу состояния сельскохозяйственных земель и посевов;
- объединенную систему работы со спутниковыми данными центров приема и обработки спутниковой информации Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;
- информационную систему «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил»;
- информационную систему контроля данных сельскохозяйственной микропереписи 2021 года об использовании сельскохозяйственных угодий с использованием средств спутникового мониторинга.

С использованием разработанных технологий созданы базы многолетних геопространственных данных о динамике растительного покрова России, позволившие выявить долгосрочные тенденции изменений площади лесов страны с начала XXI века, установить закономерности сезонной и типологической изменчи-

ности пирогенной гибели лесов, развить подходы к оперативному прогнозированию деструктивного воздействия пожаров на леса. Это, в свою очередь, позволило сформировать методическую и информационную основу мониторинга бюджета углерода в лесах России, приобретающего особое значение в условиях меняющегося глобального климата и действия международных соглашений по регулированию выбросов парниковых газов в атмосферу.

Разработаны методы компьютерной обработки изображений и искусственного интеллекта (рисунок 8), позволяющие уменьшить влияние оптических аберраций на качество получаемого изображения и обеспечить высокое качество распознавания схожих объектов на гиперспектральных данных (рисунок 9).

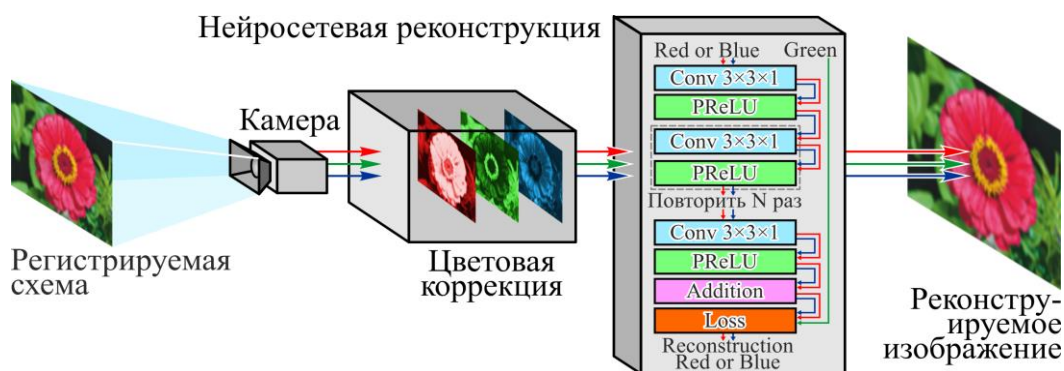


Рисунок 8 – Схема нейросетевой реконструкции изображений, получаемых с помощью дифракционной оптики

Разработаны технологии искусственного интеллекта для решения задач консолидации мультимодальных данных и реализован вычислительно эффективный программный инструментарий в виде программных библиотек, фреймворков и программных модулей, которые позволяют обрабатывать данные дистанционного зондирования Земли и решать базовые задачи для определения и классификации различных распределенных объектов поверхности Земли (пахотных земель, земли поселений и линейной инфраструктуры, сенокосов и пастбищ, водно-болотных угодий), определения интегральных характеристик этих объектов (например, оценки запаса углерода лесов на локальном уровне, оценки выбросов углерода в результате лесных пожаров, оценки интегральных потоков парниковых газов, и др.) и, наконец, давать рекомендации для поддержки технических и организационных решений.

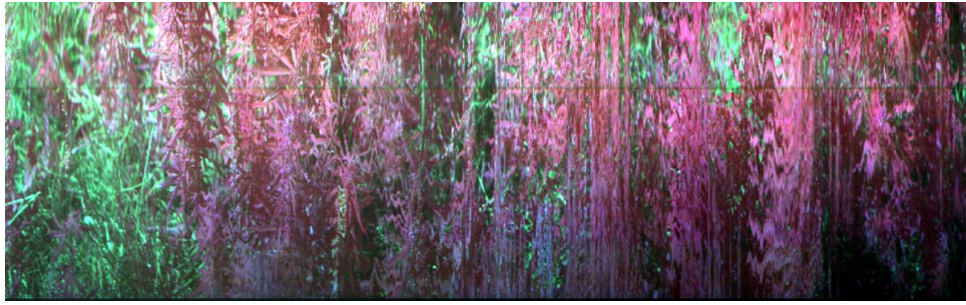


Рисунок 9 – Обнаружение конопли в основной массе растительности, снятой гиперспектрометром: конопля выделена красным цветом

На рисунках 10 и 11 приведена схема уточнения пространственных данных о расположении и изменении состояния объектов инфраструктуры.

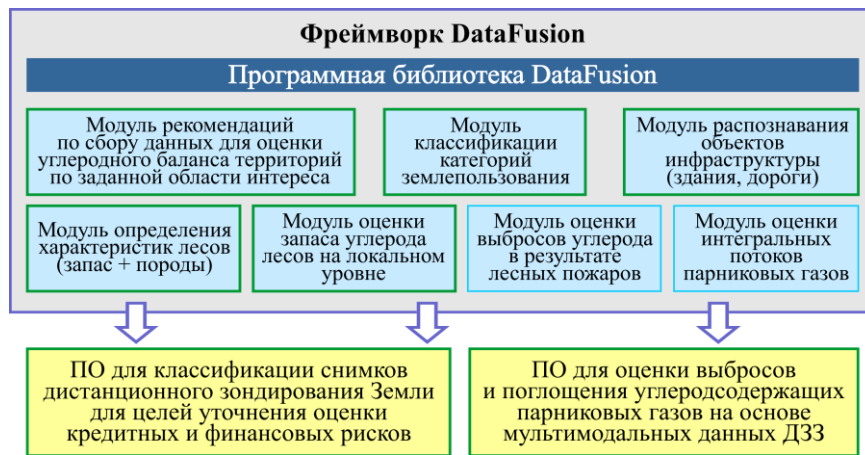


Рисунок 10 – Схема фреймворка для консолидации мультимодальных данных



Рисунок 11 – Схема оценки характеристик объектов инфраструктуры

На базе созданного инструментария для консолидации мультимодальных данных было реализовано прикладное программное обеспечение (ПО) для оценки выбросов и поглощения углеродсодержащих парниковых газов. Использование этого ПО позволило существенно уточнить кадастр парниковых газов на разных уровнях (национальный, региональный, локальный), а также проводить инвентаризацию породно-возрастной структуры древостоев и оценку запасов стволовой древесины с последующим уточнением запасов углерода.



Данный инструментарий также позволил реализовать прикладное ПО, позволяющее оценивать кредитные и финансовые риски, вызванные природными и антропогенными аномалиями и /или катастрофами (например, оценивающие потери по риск-событию (последствия чрезвычайных ситуаций), или уточняющие риски таяния вечной мерзлоты и оценивающие вызванный этим ущерб. Проведена отработка созданного ПО в ряде регионов РФ, а также произведено внедрение ПО в автоматизированные системы оценки кредитных и финансовых рисков.

Основой работы авторского коллектива служат 7 монографий, 9 патентов на изобретения, 5 свидетельств на государственную регистрацию программ для ЭВМ, 137 статей, в том числе в престижных журналах с высоким импакт-фактором.

**Области применения:** повышение эффективности управленческих решений в различных отраслях цифровой экономики, мониторинг окружающей среды, антропогенных объектов и инфраструктуры, в том числе: повышение рентабельности сельскохозяйственного производства, мониторинг водных биологических ресурсов и лесной растительности, гидрометеорологический контроль и мониторинг лесных пожаров, анализ динамики атмосферы, экологический контроль и мониторинг вулканической активности, дистанционная оценка бюджета углерода в наземных экосистемах России, выявление скрытых объектов и посадок наркосодержащих растений, автоматизация научных исследований и испытаний новой техники.

Разработанные технологии используются для создания и поддержки информационных систем в интересах различных ведомств и организаций (Рослесхоз, Росстат, Министерство сельского хозяйства РФ, Росгидромет, Россети, МЧС, Сбербанк, различные региональные системы цифровой экономики и предприятия).

**Социальный эффект** разработки обеспечивается благодаря расширению возможностей мониторинга среды обитания человека, прогнозированию и контролю последствий природных и техногенных аварий, повышению оперативности и эффективности управленческих решений в задачах цифровой экономики.

**Экономический эффект** разработки составляет 2,3 миллиарда рублей.