На правах рукописи

Виноградов Юрий Анатольевич

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПАССИВНОЙ ИНФРАЗВУКОВОЙ ЛОКАЦИИ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В АТМОСФЕРЕ

Специальность 25.00.10. – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Обнинск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр Единая Геофизическая служба Российской академии наук

Научный консультант:

Куличков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Минлигареев Владимир Тимурович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, заместитель директора по научной работе; Соколова Инна Николаевна, доктор физико-математических наук, Институт геофизических исследований Республиканского государственного предприятия Национального ядерного центра Республики Казахстан, руководитель группы анализа и научных исследований;

Шершаков Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-производственное объединение «Тайфун», научный руководитель.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Защита диссертации состоится **«19» мая 2022 г. в 11 часов** на заседании Диссертационного совета Д 002.050.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте Aдрес сайта: http://idg.chph.ras.ru/ru/watch/vinogradov_dissertation Автореферат разослан « » февраля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат физико-математических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В Федеральной космической программе России на 2016-2025 гг. отмечается важность практического решения экологических проблем, возникающих в результате космической деятельности (Воздействие..., 2016). Обеспечение безопасности вдоль трасс запусков космических аппаратов (КА) и в районах падения отделяющихся частей (ОЧ) ракет-носителей (РН) является важным элементом космической деятельности. Непрерывное развитие промышленной и сельскохозяйственной инфраструктур, введение в хозяйственный оборот новых земель, ужесточение экологического законодательства, принятие новых земельных законов существенно усложняют проблему отведения районов падения ОЧ для новых трасс запусков КА (Куреев, 1999). Кроме проблемы обеспечения безопасности вдоль уже существующих трасс запуска КА и в выделенных районах падения, в настоящее время актуальна проблема отведения новых районов для приема ОЧ РН, запускаемых с космодрома «Восточный», и обеспечения экологической безопасности вдоль новых трасс запуска КА. Результаты проводимых в последние годы пусков РН «Союз» и «Протон» показывают, что имеет место значительное отклонение размеров фактических эллипсов рассеивания точек падения ОЧ РН от расчетных данных, приведенных в баллистической документации предприятий-разработчиков. Повышение точности прогнозирования точек падения отделяющихся частей и фрагментов их конструкции возможно при привлечении дополнительной информации о реальных кинематических параметрах их полёта на конечном участке траектории. Использование существующей технологии внешнетраекторных измерений полёта ступеней РН (установка активных ответчиков или навигационной аппаратуры потребителя) затруднено, так как конструкция ступени при снижении с гиперзвуковой скоростью может разрушаться случайным образом. В работе (Булекбаев, 2014) отмечается, что на сегодняшний день измерительные средства у поисковых групп для определения точек падения фрагментов практически отсутствуют. Технические средства оптического наблюдения относятся к полигонному оборудованию, поскольку весят несколько сотен килограммов и требуют для установки стационарное бетонное основание. Их применение ограничено в условиях плохой видимости. Мобильные радиолокационные станции, с одной стороны, очень

дорогие, а с другой стороны, условия их применения ограничены необходимостью оборудования специальных бетонных площадок и оснащения мощными источниками питания.

Таким образом, проблема прокладки новых трасс запуска КА, отведения новых районов падения фрагментов ОЧ РН и определения фактических эллипсов рассеивания фрагментов отделяющихся ступеней РН является актуальной, особенно в свете развития нового космодрома «Восточный» на Дальнем Востоке России. Данная проблема имеет не только организационное содержание (необходимость согласований на различных уровнях, вывод земель из землепользования и т.п.), но и требует разработки новой методологии прогнозирования районов падения ОЧ РН с учетом оперативных данных о состоянии атмосферы и фактора их разрушения на пассивном участке траектории, а также создании измерительных и программных средств, для оперативного контроля снижающихся фрагментов в режиме близком к реальному времени.

Объектом научных исследований являются инфразвуковые волны, генерируемые различными движущимися объектами, и закономерности их распространения и затухания в атмосфере.

Предмет научных исследований – основные факторы, способствующие надежной, гарантированной регистрации инфразвуковых сигналов от источников различного типа, определение типов источников и их локация в атмосфере.

Цель исследования заключалась в разработке на основе эффективной технологии, опирающейся на современные достижения теории распространения звуковых волн в неоднородной среде, универсального аппаратно-программного комплекса для пассивной инфразвуковой локации объектов, движущихся в атмосфере и решения широкого круга научных и прикладных задач.

Основная идея работы состоит в использовании выявленных в последнее десятилетие закономерностей распространения инфразвуковых волн в атмосфере, образующихся при движении объектов в атмосфере, для создания эффективных моделей, алгоритмов, программных комплексов и аппаратуры, позволяющих производить пеленгацию мест генерации инфразвуковых сигналов, оперативно распознавать и классифицировать типы источников сигналов, на основе специально разработанной базы данных типовых волновых

форм, и в режиме близком к реальному времени прогнозировать координаты возможных мест падения объектов на земную поверхность.

Методы исследований. Поставленные задачи решались комплексным методом, включающим: анализ и обобщение существующих методов регистрации и обработки инфразвуковых сигналов; математическое моделирование распространения звуковых и инфразвуковых волн в неоднородной среде; натурные экспериментальные исследования по изучению влияния строения и состояния атмосферы на распространение инфразвуковых сигналов; разработку алгоритмов для создания аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации движущихся в атмосфере объектов; компьютерную обработку, анализ и интерпретацию геофизической информации, полученной в натурных экспериментах, физическое моделирование.

Научная новизна диссертации заключается в разработке оригинальных, научно-обоснованных и эффективных алгоритмов, методик и технологий, а также в создании пионерного аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации, успешно прошедшего практическую апробацию в течении 2010–2021 гг. при решении различных практических задач Роскосмоса и МЧС РФ.

Основные положения, выносимые на защиту, отражающие главные результаты диссертационной работы:

1. Новый алгоритм выделения и выборки коррелированных по форме и времени прихода инфразвуковых импульсов на систему, состоящую из 3 инфразвуковых датчиков, впервые примененный для выделения слабых инфразвуковых сигналов импульсного типа, который позволяет надежно и более эффективно, чем традиционно применяемые методы, детектировать сигналы от источников инфразвука различного происхождения.

2. Новый метод пеленгации движущихся в атмосфере объектов, позволяющий с использованием 2-х и более мобильных инфразвуковых групп, надежно определять места падений, как одиночных, так и летящих группой многочисленных объектов, снижающихся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью и генерирующих ударные волны. Данный метод был *впервые* применен для целей ракетно-космической отрасли, доказав свою высокую эффективность.

3. Действующий портативный *аппаратно-программный комплекс*, предназначенный для решения широкого круга научных и прикладных задач, использующий современные средства передачи данных, обеспечивающий надежную регистрацию, накопление и оперативную передачу зарегистрированных данных в центр обработки в режиме близком к реальному времени.

4. Уникальная база данных волновых форм, созданная на основе многолетних наблюдений и подтвержденная данными физического моделирования, включающая различные параметры инфразвуковых сигналов, генерируемых различными фрагментами снижающихся частей ракет-носителей. Использование этой базы данных позволяет в оперативном режиме определять возможный тип источника генерации инфразвуковых сигналов по зарегистрированным данным.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием апробированных на практике классических и современных методов и моделей распространения звука в неоднородной среде, а также данными многочисленных экспериментов, проведенных автором.

Практическая значимость работы заключается в разработке методического, аппаратурного и программного обеспечения, аппаратно-программного комплекса для инфразвуковой локации объектов, движущихся в атмосфере, предназначенного для решения широкого круга научных и прикладных задач. Применение опытного образца комплекса при осуществлении пусков ракеты-носителя нового типа «Ангара», позволило сэкономить не менее 50 млн. рублей, оперативно обнаруживать упавшие фрагменты и подтверждать успешность запусков.

Основные научные результаты работы использованы при выполнении опытно-конструкторской работы «Разработка и создание опытного образца автономной полевой станции обслуживания районов падения отделяющихся частей ракет-носителей и отработка в реальных условиях способов и режимов ее применения», утвержденном ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», и составной части опытно-конструкторской работы «Создание комплекса эксплуатации районов падения отделяемых частей PH «Ангара», ряда коммерческих договоров по определению мест

падения фрагментов второй ступени ракеты-носителя «Протон» при запуске спутников различного назначения, в Программе обучения по курсу дополнительного образования «Программные средства для инфразвуковой локации объектов в атмосфере», внедренной в образовательный процесс Кольского филиала Петрозаводского Государственного университета в 2014 году.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты работы с 2003 по 2021 гг. докладывались на более чем 40 симпозиумах, международных научно-технических конференциях, научно-практических конференциях; специальных семинарах в заинтересованных организациях.

По результатам работы получены 3 патента РФ, 1 авторское свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 2 акта внедрения результатов работы.

Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 63 печатных работах, внесенных в базу РИНЦ, в том числе 19 печатных работ из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденного ВАК, и 12 печатных работ в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Список опубликованных работ автора приводится в конце автореферата.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи, выборе методов исследований; в публикациях, выполненных в соавторстве; автор лично участвовал в экспедиционных работах, сборе и анализе экспериментальных данных, интерпретации полученных результатов и на их основе совершенствовании и доработке основных элементов аппаратно-программного комплекса. Основные исследования по теме диссертации выполнены в Кольском филиале Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба Российской академии наук» в кооперации с Государственным космическим научно-производственным центром имени Хруничева.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 262 наименований. Работа изложена на 225 страницах машинописного текста и содержит 99 рисунков и 23 таблицы.

Благодарности. Автор благодарен научному консультанту доктору физико-математических наук Куличкову С.Н. за ценные советы при подготовке работы, кандидату физико-математических наук Асмингу В.Э. за его участие

в разработке оптимальных алгоритмов расчета, написание программного обеспечения и активную совместную работу практически на всех этапах исследования. Особую благодарность автор выражает начальнику департамента ГКНПЦ им. Хруничева кандидату технических наук Роскину О.К. за инициирование данной работы и всемерную ее поддержку при проведении экспериментальных наблюдений. Автор считает своим долгом отметить, что реализация идеи использования беспилотных летательных аппаратов для передачи данных и поиска упавших фрагментов была бы невозможна без кооперации с ООО «Специальный технологический центр» и лично с кандидатом технических наук Хохленко Ю.Л., Аврамовым А.В., Павловым Н.А. Большую помощь в создании технической части комплекса оказали инженеры КоФ ФИЦ ЕГС РАН Воронин А.И., Коцуба В.Н., Снегов Д.В., Постнов В.О. и Федоров И.В. Автор искренне признателен всем, кто оказывал действенную помощь в проведении натурных наблюдений, организации полевых и экспедиционных работ, прежде всего сотрудникам ГКНПЦ им. Хруничева, ФГУП ЦЭНКИ и Института водно-экологических проблем Сибирского отделения РАН.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается проблемная ситуация, которая инициировала написание данной работы, дается описание актуальности и новизны, выбранной для защиты темы, формулируются основные научные положения, выносимые на защиту, обосновывается практическая значимость работы, приводятся сведения о ее апробации и личном вкладе автора, а также высказываются благодарности коллегам, способствовавшим появлению данной работы.

Обеспечение безопасности, в том числе, экологической, вдоль трасс запусков космических аппаратов и в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей является важным элементом космической деятельности. Основными направлениями обеспечения экологической безопасности являются: сокращение площадей районов падения отделяемых частей ракет-носителей, в том числе за счет совмещения районов падения отделяемых частей различных ракет-носителей; снижение остатков топлива в отработанных ступенях; экологическое обследование районов падения, космодромов и технологических объектов; поиск, фиксация и утилизация фрагментов отделяющихся частей ракет-носителей; детоксикация почвы на местах падения отделяющихся частей и ликвидация возникающих пожаров.

Насколько актуальна проблема обеспечения ракетно-космической деятельности районами падения свидетельствуют следующее – общая площадь районов падения для обеспечения пусков различных ракет-носителей с космодромов «Байконур», «Плесецк» и «Восточный» составляет более 21 *млн. га.* Из них 45 % расположены в зоне активной хозяйственной деятельности и каждый год этот процент увеличивается.

В работах многих авторов (Чураков и др., 2011; Куреев, 1999) отмечается, что размеры отчуждаемых территорий, выделяемых под районы падения, определяются, исходя из условия попадания снижающихся фрагментов в эти районы при пусках с имеющихся стартовых комплексов в любое время года, при существенно различных состояниях атмосферы. Многочисленные случаи падения фрагментов отделяющихся частей ракет-носителями за пределами отведенных районов указывают на недостаточную адекватность расчетных траекторий движения ступеней ракет на пассивном участке траектории реальному полету, что приводит к снижению уровня безопасности близлежащих военных и гражданских объектов и населения, нанесению ущерба окружающей среде, значительным материальным затратам на восстановительные работы. Удаленность, сложный рельеф, наличие леса в большинстве районов падений существенно затрудняет обнаружение фрагментов, зачастую их не обнаруживают вообще. Измерительные средства поисковых групп для определения точек падения фрагментов на сегодняшний день практически отсутствуют.

Таким образом, в настоящее время возникла проблемная ситуация, в основе которой лежит противоречие между возможностями существующего математического аппарата по прогнозированию районов падения снижающихся ступеней ракет-носителей и результатами реальных пусков. Необходимость разработки новой методологии прогнозирования районов падения отделяющихся частей ракет-носителей с учетом оперативных данных о состоянии атмосферы и фактора их разрушения на пассивном участке траектории, а также создании измерительных и программных средств, для оперативного контроля снижающихся фрагментов в режиме реального времени непосредственно в районах падений не вызывает никаких сомнений. В данной работе описывается мобильный автономный аппаратно-программный комплекс пассивной инфразвуковой локации разработанный и внедренный в состав измерительных средств, обеспечивающих безопасность при проведении пусков ракеты-носителя нового типа «Ангара». Применение комплекса позволило разработать новый, теоретически обоснованный и практически апробированный, метод пеленгации объектов, движущихся в атмосфере, позволяющий с использованием 2-х и более мобильных инфразвуковых групп, надежно определять места падений как одиночных, так и летящих группой многочисленных объектов, снижающихся со сверхзвуковой скоростью и генерирующих ударные волны в атмосфере. Данный метод был впервые успешно применен для целей ракетно-космической отрасли, доказав свою высокую эффективность при применении в районах падений 1-х и 2-х ступеней ракет-носителей «Союз», «Протон» и «Ангара».

Таким образом, в настоящей работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в экологическую безопасность ракетно-космической деятельности на территории Российской Федерации. Результаты применения работы в хозяйственной деятельности (при осуществлении пусков ракет-носителей и уточнения площадей районов падения) приносят конкретный экономический эффект.

В Главе 1 дается краткое описание инфразвукового метода мониторинга и современное состояние исследований по этому научному направлению в мире, рассмотрены типовые источники инфразвуковых колебаний, возбуждаемые в атмосфере движущимися объектами, отражены современные подходы к проведению инфразвукового и акустического мониторинга, проводимого ведущими специалистами различных стран мира, рассмотрены современные модели атмосферы, обоснован их выбор для применения в составе описываемого аппаратно-программного комплекса, рассматриваются основные тенденции развития инфразвукового метода мониторинга.

В разделе 1.1 проводится обзор современного состояния в области инфразвуковых исследований.

Как известно звуковые волны являются продольными волнами, при которых движение частиц происходит в том же направлении, что и распространение. Звуковая волна, проходящая через газовую среду, нарушает ее равновесное состояние за счет сжатия и разрежения. Инфразвук распространяется в атмосфере со скоростью звука, которая составляет 343 м/с при температуре 20°С. Эта скорость сильно зависит от температуры и направления ветра и увеличивается с повышением температуры и при наличии попутного ветра, и, соответственно, уменьшается с понижением температуры и встречным ветром. Также в работе будут рассмотрены ударные волны, распространяющиеся в атмосфере в виде фронта резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны генерируются в том случае, когда объект перемещается быстрее, чем скорость звука. Эти волны являются нелинейными и некоторое время, в зависимости от энергии удара, распространяются со скоростями, превышающими скорость звука, но, на некотором расстоянии от центра возбуждения, ударные волны вырождаются в акустические и далее распространяются по законам звуковых волн.

В современном мире наблюдениям за распространением инфразвуковых колебаний уделяется все большее и большее внимание. Это связано с относительно невысокой стоимостью создания инфразвуковых станций мониторинга и большим объемом информации, получаемым в процессе наблюдения. Мощный импульс развития сети инфразвуковых станций мониторинга дало подписание в 1996 г. «Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний» (ДВЗЯИ) и включение наблюдений за инфразвуком в глобальную международную сеть мониторинга (IMS), наряду с сейсмическими, гидроакустическими и радионуклидными методами наблюдения (Campus et al, 2006). В рамках этого договора, начиная с 1997 г. и по настоящее время в сети IMS установлено и работает 60 инфразвуковых станций наблюдения.

Современные исследования касаются таких аспектов как: модели источников инфразвука, модели распространения инфразвука и инструменты для регистрации инфразвука. Все более мощные вычислительные машины и средства наблюдения за атмосферой позволяют получать детальные знания для того, чтобы надежно определять типы источников инфразвука и их местопо-

ложение в пространстве. Станции мониторинга инфразвука постоянно регистрируют много когерентных инфразвуковых сигналов, генерируемых различными естественными и техногенными источниками. Многими исследователями установлено, что катастрофические возмущения атмосферы в виде смерчей, тайфунов, ураганов, гроз и т.д. сопровождаются низкочастотными инфразвуковыми колебаниями, распространяющимися на расстояния в несколько тысяч километров от источников. Акустические волны могут являться предвестниками землетрясений, цунами. Инфразвуковой мониторинг может быть использован для дистанционного мониторинга штормов в океане, крупных пожаров, извержений вулканов, геомагнитных возмущений, взрывов, стартующих и снижающихся ракет и их частей, сверхзвуковых и дозвуковых летательных аппаратов, метеоритов, гроз и ряда других источников. Описание сигналов от таких источников приводится во многих научных обзорах. Для целей данной работы наиболее важными являются сигналы, генерируемые в атмосфере сверхзвуковыми летательными аппаратами, ракетами и метеорами, поэтому информация об этих источниках рассматривается с большей детальностью.

В разделе 1.2 проводится обзор исследований по регистрации инфразвуковых сигналов в атмосфере, возбуждаемых взрывами.

Основными источниками воздушных ударных волн в атмосфере, вызывающими инфразвуковые колебания, являются взрывы различного типа: при проведении горновзрывных работ, при строительстве различных инженерных сооружений, военного назначения, включая ядерные, аварийные взрывы газопроводов и т.д. При любом из указанных типов взрыва происходит быстрое, практически мгновенное, выделение энергии в ограниченном объеме, сопровождающееся расширением газообразных продуктов взрыва и образованием воздушной ударной волны. В зависимости от начального давления в продуктах взрыва, их состава и свойств расширение облака продуктов происходит с различной скоростью, сопровождаясь образованием ударных волн различной интенсивности.

Основными параметрами воздушной ударной волны, которые поддаются непосредственному измерению, являются: скорость движения фронта ударной волны и ее изменение во времени; максимальное давление на фронте

ударной волны; импульс давления положительной и отрицательной фазы ударной волны; продолжительность положительной и отрицательной фазы. По этим параметрам воздушной ударной волны за многие годы их регистрации собраны и систематизированы огромные базы экспериментальных данных как по взрывам химических взрывчатых веществ, так и по ядерным взрывам. По результатам обработки этих данных установлены экспериментальные зависимости основных параметров ударной волны от энергии взрыва и расстояния.

Характеристики принимаемого инфразвука определяются не только мощностью, но и в значительной степени состоянием среды, в которой происходит распространение. Период волны пропорционален мощности взрыва, и поскольку затухание звука в атмосфере пропорционально квадрату частоты волны, то эффект от взрывов можно обнаружить на значительном расстоянии от источника. В таких случаях создается благоприятная ситуация для проведения экспериментов с целью выяснения влияния атмосферы на распространение инфразвука при различных метеорологических условиях с целью тестирования и отладки существующих моделей атмосферы. При регистрации инфразвуковых сигналов от взрывов в дальней зоне от одного и того же источника могут зачастую наблюдаться несколько фазовых приходов, характеризующихся разной групповой скоростью, т.к. инфразвуковые волны могут распространяться по нескольким атмосферным волноводам (рисунок 1). Амплитуды и частоты инфразвуковых сигналов могут лежать соответственно в диапазонах от сотых долей Πa до единиц Πa , в частотном диапазоне 0.1–4 $\Gamma \mu$.

Таким образом, взрывы являются основным техногенным источником инфразвуковых волн. Так как их координаты, а зачастую и мощность точно известны, то именно взрывы служат калибровочными источниками для отладки систем детектирования, построения и верификации моделей распространения инфразвуковых сигналов, а также для разработки критериев оценки мощности источника по инфразвуковым данным.



Рисунок 1. Траекторные расчеты путей распространения в атмосфере инфразвукового сигнала от взрыва на поверхности земли для скоростной модели атмосферы, приведенной слева

В разделе 1.3 подробно рассматриваются примеры регистрации инфразвуковых сигналов, возбуждаемых движущимися в атмосфере объектами – самолетами, ракетами и метеоритами.

При сверхзвуковом движении перед летящим объектом образуется конус Маха – узкая зона скачка давления, движущаяся вместе с объектом. При обтекании сверхзвуковым газовым потоком твёрдого тела на его передней кромке образуется ударная волна. На фронте ударной волны, являющейся по сути скачком уплотнения, имеющем очень малую толщину (доли миллиметра), происходят кардинальные изменения свойств потока – его скорость относительно тела снижается и становится дозвуковой, а давление в потоке и температура газа резко возрастают. Часть кинетической энергии потока превращается во внутреннюю энергию газа. Все эти изменения тем больше, чем выше скорость сверхзвукового потока. Фронт ударной волны по мере удаления от аппарата постепенно принимает почти правильную коническую форму, перепад давления на нём уменьшается с увеличением расстояния от вершины конуса, и ударная волна превращается в звуковую. Когда фронт волны достигает наблюдателя, находящегося, например, на поверхности земли, он слышит громкий звук, похожий на взрыв. Импульсный сигнал, регистрируемый в таких случаях инфразвуковыми группами, соответствует пересечению территории, на которой расположена инфразвуковая группа, конусом Маха. Отличительным свойством этих сигналов является то, что азимуты на источник, по-

строенные по записям нескольких групп, не пересекаются в одной точке, поскольку на разные группы приходят сигналы, порожденные разными участками траектории движения объекта.

Обычные значения энергии акустических импульсов вблизи источников соответствуют эквивалентным взрывам порядка десятков килограмм тринитротолуола (ТНТ). До земной поверхности эти сигналы доходят, имея частоты в пределах от 0.3 до 12 $\Gamma \mu$ и вариации давления от 0.01 до 10 Πa . Максимум спектра таких сигналов обычно приходится на частоты 2.5–3 $\Gamma \mu$.

В разделе приводятся примеры регистрации инфразвуковых сигналов, вызванных регулярными полетами сверхзвукового пассажирского лайнера «Конкорд» (Concorde) по маршруту Европа-Америка и обратно за период 1976–1977 год. За время наблюдений около 1.5 лет было зарегистрировано более 500 сигналов, вызванных пролетом «Конкорда» (Liszka, 2008), причем их идентификация именно к этому источнику не вызывала сомнений, т.к. самолет следовал одним и тем же маршрутом, по заданному расписанию. Сигналы регистрировались тремя инфразвуковыми группами, расположенными на расстоянии от 2000 до 4000 км от источника сигнала в городах Кируна, Лулео и Ликселе. По результатам наблюдений были сделаны следующие выводы: большие сверхзвуковые самолеты, такие как «Конкорд», могут быть надежно обнаружены инфразвуковыми станциями мониторинга на значительных расстояниях от маршрута полета (от 2000 до 5000 км); в инфразвуковом сигнале преобладают частоты от 1 до 3 Ги; сигналы с такой частотой распространяются в нижнем атмосферном волноводе, расположенном на высоте стратопаузы (40–45 км) практически без затухания. Также в разделе приводятся сигналы, вызванные пролетами сверхзвуковых истребителей МиГ-29 и Су-27.

При старте ракеты и ее движении в атмосфере после запуска возникают разнообразные по характеру излучения и мощности акустические поля. Акустические волны и шумы от ракет можно разделить на следующие категории: акустические шумы от работающих двигателей ракет при стендовых испытаниях; акустические шумы от работающих двигателей ракет при старте и полете; акустические волны от звуковых ударов, возникающих при прохождении ракетой через звуковой барьер.

Инфразвук от запуска ракет тяжелого класса может быть зарегистрирован на расстояниях до 5000 км. Такие сигналы обычно имеют частоты от 0.01 $\Gamma \mu$ до 10 $\Gamma \mu$ и длительность от 1 до несколько минут. Амплитуды на расстояниях до 1000 км, варьируются от нескольких десятков $M\Pi a$ до более чем 2 Πa , в зависимости от времени года и степени сонаправленности стратосферных ветров вдоль направления волны распространения. Несмотря на крайне разреженную атмосферу на высотах более 100 км (выше линии Кармана) имеются факты регистрации сигналов от пролета тяжелых ракет на орбитальной высоте (около 188 км). Имеется огромное количество записей стартов и пролетов ракет различных типов, записанные различными инфразвуковыми станциями по всему миру (Balachandran and Donn, 1971; Posmentier, 1971; Campus, 2004).

В работе выполненной немецкими исследователями (Pilger et al., 2021) приводится анализ 1001 запуска ракет за 11.5 лет наблюдений, зарегистрированных на инфразвуковых станциях, входящих в глобальную сеть ДВЗЯИ. Авторы собрали 7637 инфразвуковых записей, соответствующих пускам различного типа ракет. Этот набор данных позволил получить разнообразные характеристики инфразвукового сигнала от различных фаз запуска и движения ракеты. Такой большой массив данных позволил вывести соотношение между энергией тяги ракеты и акустической амплитудой с поправкой на расстояние и условия распространения, что позволяет определять тип ракеты в зависимости от характеристик регистрируемого инфразвука (рисунок 2).



Рисунок 2. Оценка энергии, выделяемой первой ступенью ракет различного типа, по измеренным среднеквадратичным амплитудам с поправкой на расстояние и условия распространения (RMS– среднеквадратичное значение)

Начиная с 2000-х годов, когда количество станций инфразвукового наблюдения стало достаточно большим в Америке, Канаде и Европе, возросло количество регистраций инфразвуковых сигналов от метеоритов. Инфразвуковые данные стали хорошим дополнением к оптическим или радиолокационным наблюдениям и позволили производить примерную количественную оценку энергии метеоритов (Адушкин и др., 2005). Наблюденные данные по азимутам прихода, времени прихода и углу подхода (углу падения) инфразвуковой волны достаточно хорошо совпадали с данными математического моделирования путей распространения сигналов, рассчитанных с учетом эмпирических моделей атмосферы или доступных метеорологических данных. Большое внимание исследователей вызвал пролет Челябинского метеорита. В разделе приводятся данные нескольких исследовательских групп по оценке его энергии (Ророva et al., 2018; Le Pichon et al., 2013; Куличков и др., 2018).

В разделе 1.4 приводится краткий обзор современных моделей атмосферы.

От выбора правильной и наиболее точно соответствующей реальным условиям места проведения работ модели атмосферы зависит точность расчета распространения инфразвукового сигнала от источника до точки приема, а значит и последующая точность определения координат мест падения фрагментов ракет-носителей.

Состояние атмосферы зависит от многих факторов: скорость ветра, облачность, давление, влажность и др. Все эти факторы можно отразить в количественном виде: метры в секунду, миллиметры ртутного столба и пр. Если соотнести все показатели между собой, то можно получить математическую модель атмосферы. Для решения задачи распространения инфразвука в сложной и очень изменчивой атмосфере обычно используют менее детализированные модели, чем те, что используются для прогноза изменений погоды.

В общем случае модель атмосферы – это выраженная в математическом виде теоретическая схема пространственно-временного распределения параметров атмосферы при определённых упрощающих предположениях относительно её свойств. Модели атмосферы классифицируются на среднестатистические и прогностические (Толстых, 2016). В данной работе использовались среднестатистические модели. Среднестатистические модели описываются совокупностью формульных зависимостей, базирующихся на аппроксимации с помощью рядов (Фурье, степенного и др.) табличных функций метеорологических величин, полученных в результате обобщения данных аэрологических измерений за период порядка 15–20 лет. Для уменьшения объема коэффициентов разложения при описании вертикальных распределений термодинамических параметров применяют уравнения статики и газового состояния атмосферы, а при вычислении ветра – геострофические соотношения. В свою очередь среднестатистические модели можно подразделить на климатические и вероятностные (модели «случайной» атмосферы).

Климатические модели определяют многолетний среднестатистический годовой ход значений метеопараметров над различными районами Земли, обусловленный движением Земли вокруг Солнца и наклоном оси её собственного вращения к плоскости эклиптики. Они позволяют рассчитывать в слое от 0 до 100 км осредненное за год (сезон, месяц или сутки) вертикальное распределение термодинамических параметров, зональной и меридиональной составляющих ветра в точках с заданными географическими координатами.

Модели случайной атмосферы определяют случайные вариации метеопараметров относительно их среднестатистических значений, обусловленные многочисленными кратковременными причинами (Марчук, 1967). Эти модели базируются на представлении вариаций термодинамических параметров и составляющих скорости ветра в виде канонического разложения либо разложения по эмпирическим ортогональным функциям, в качестве которых используются собственные векторы корреляционной матрицы связи метеопараметров на различных высотах, нормированные собственными значениями.

В диссертационной работе дается описание глобальных атмосферных моделей Гидрометцентра России, NRL-MSISE-00 (Picone, 2002), HWM93 (Hedin et al.,1996). Также в разделе дается краткое описание моделей атмосферы, используемых для прогноза погоды – глобальная модель европейского центра среднесрочных прогнозов ECMWF и американская глобальная модель Национальной метеорологической службы Соединенных Штатов – FS27. Для расчета атмосферных моделей в районах расположения космодромов «Плесецк» и «Байконур» существуют локальные модели определения горизонтальной скорости ветра и термодинамических параметров атмосферы, выпущенные в виде отраслевых стандартов – стандарт ОСТ 92-5165-92 для района космодрома «Байконур» и стандарт ОСТ 92-9704-95 для района космодрома «Плесецк», соответственно.

В разделе 1.5 рассмотрены основы теории распространения инфразвука в атмосфере.

Акустическую волну в атмосфере можно рассматривать как колебательное движение гидродинамических частиц с малыми амплитудами в сжимаемой жидкости. В каждом месте жидкости в акустической волне происходят попеременные сжатия и разрежения. В связи с этим для расчета параметров движения акустической волны используются классические уравнения гидродинамики (Бреховских, 1973, Ландау, 1986). При распространении волны в газе целесообразно использовать понятие – «фронт волны». Фронт волны – это поверхность, на которой волновой процесс имеет одинаковую фазу колебания, либо сжатия, либо растяжения. Таким образом, распространение акустической волны будет происходить в направлении, перпендикулярном поверхности фронта. В случае, когда амплитуда и направление волны остаются неизменными на протяжении расстояний, сравнимых с длиной волны, можно ввести понятие о лучах как о линиях, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением распространения волны, и тогда принято говорить о распространении акустики (инфразвука) вдоль лучей, отвлекаясь при этом от её волновой природы. В этом случае применимы уравнения лучевой акустики. При решении задачи распространения акустических волн в атмосфере необходимо учитывать следующее:

1) акустическая волна, генерируемая различными техногенными источниками, как правило, имеет несинусоидальный характер: начальный акустический импульс имеет сложный вид и ограничен во времени и в пространстве (Чунчузов и др., 2010);

2) при дальнем распространении акустического импульса он проходит расстояния, на которых свойства атмосферы изменяются достаточно сильно,

при этом, для повышения точности расчетов желательно, чтобы расчетные и реальные параметры атмосферы максимально совпадали (Куличков, Буш, 2001);

3) для адекватного описания процесса распространения акустических волн уравнения, описывающие этот процесс, должны также учитывать нелинейные эффекты, прежде всего поглощение и геометрическую расходимость волнового фронта (Буш и др., 1977; Дробжева, 2016).

В большинстве случаев при интерпретации результатов наблюдений считается, что если первичным носителем акустической энергии является ударная волна, то она на некотором расстоянии от центра взрыва вырождается в акустическую волну и далее распространяется по законам звуковых волн, т.е. без учета нелинейных эффектов.

В Главе 2 рассматриваются вопросы аппаратно-технического обеспечения комплекса инфразвуковой локации. В данной главе производится анализ имеющейся аппаратуры для регистрации инфразвука, приводится обоснование выбора инфразвуковых датчиков. Дается подробное описание процесса создания и развития технической (аппаратной) части комплекса, описание его составных частей и их взаимодействия между собой.

В разделе 2.1 дается описание применяемой для регистрации инфразвука аппаратуры. Приводится описание микробарографов Chapparal, MB-2000, MБ-03, низкочастотных микрофонов свободного поля, современных микробарографов, изготовленных с применением MEMS-датчиков.

Современные инфразвуковые станции обычно включают в себя инфразвуковой сенсор (микробарограф, низкочастотный микрофон, MEMS-сенсор), усилитель сигнала, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок питания, накопитель для сбора данных и, как правило, пространственный инфразвуковой фильтр, предназначенный для снижения шума ветра. Инфразвуковой сенсор – основной элемент для измерения инфразвука, определяющий частотный диапазон регистрации и качество записи сигнала. Он должен измерять изменения атмосферного давления в очень большом динамическом диапазоне и обеспечивать необходимый уровень выходного сигнала, согласованного к соответствующему АЦП, диапазон ввода которого ограничен. В целом сенсор состоит из механической части, чувствительной к изменению давления и связанного с ним преобразователя.

В настоящее время, в связи с очень широким динамическим диапазоном регистраторов, используются в основном абсолютные микробарографы, их регистрируемый диапазон составляет 0.01 $\Gamma \mu$ до 50 $\Gamma \mu$, а чувствительность до 500 *мВ/Па*.

Принцип действия низкочастотного микрофона свободного поля основан на измерении изменения емкости между двумя проводящими пластинами при изменении расстояния между ними. Эти изменения емкости могут быть преобразованы в электрическое напряжение двумя способами. Самый простой метод преобразования использует постоянный электрический заряд, который либо создается постоянным током, подводимым к пластинам конденсатора, либо заранее нанесен на одну из пластин. Микрофоны свободного поля оптимизированы для обеспечения плоской частотной характеристики в свободном звуковом поле. Именно поэтому они настроены для регистрации низких и сверхнизких частот. На более высоких частотах наличие отражений и дифракции вызывает увеличение давления на диафрагму.

Пьезоэлектронные датчики давления в настоящее время также используются для измерений инфразвука. Основной принцип пьезокристалла – способность создавать напряжение пропорциональное деформации, в случае измерения инфразвука – деформации мембраны под действием акустического давления и/или инерционных воздействий.

Современным решением для регистрации инфразвуковых колебаний является датчик давления, изготовленный по MEMS-технологии. Инфразвуковой датчик работает в частотном диапазоне от ~ 0.05 $\Gamma \mu$ до 20 $\Gamma \mu$, очень компактен и надежен.

В разделе 2.2 детально описывается аппаратная часть комплекса инфразвуковой локации – измерительная система и система сбора и передачи данных.

В 2009 г. в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН была разработана мобильная инфразвуковая станция (Виноградов и др., 2014). Здесь под словом мобильная подразумевается легко перевозимая, компактная. Каждая станция состояла из 3 инфразвуковых каналов. Ифразвуковая станция состояла из двух частей: подсистемы регистрации и преполяризованных микрофонов MPA-201 производства *BSWI Technology Ltd.* Оцифровка и система сбора данных была реализована на основе АЦП Е-24 фирмы L-card и миникомпьтера (netbook) со специализированным программным обеспечением. Привязка к мировому времени производилась посредством GPS. Для уменьшения влияния ветра каждый микрофон размещался в интегрирующей камере, заполненной поролоном, которая в свою очередь устанавливалась через уплотнительное кольцо в перфорированную пластиковую трубу. Такая схема позволяет снизить ветровую помеху в 2–3 раза в зависимости от силы ветра. Микрофоны соединялись с блоком питания и усиления посредством кабельных линий длиной до 150 m. Аналоговый сигнал с микрофонов по коаксиальным высокочастотным кабелям RG-58 подавался на подсистему регистрации. По этим же кабелям осуществлялось и питание микрофонов через преобразователь напряжения. Частота дискретизации составляла 100 $\Gamma \mu$.

Использование описанной конструкции инфразвуковой группы выявило ряд недостатков, связанных со сложностью развёртывания длинных линий проводных соединений и последующего их демонтажа по окончании работ, а также с риском повреждения проводов проезжающими снегоходами и другой техникой, в связи с чем на следующем этапе (2012–2014 гг.) была разработана модернизированная инфразвуковая станция (Федоров и др.,2020). Основное отличие данной станции в том, что сигнал от микрофонов передается на вычислитель по радиоканалу, что позволило отказаться от кабельных линий. Схема модернизированной инфразвуковой станции приведена на рисунке 3.



Рисунок 3. Схема расположения радиомикрофонов и базового модуля

Беспроводная система регистрации инфразвуковых сигналов состоит из трех модульных радиомикрофонов, каждый из которых включает в себя необходимые функциональные блоки, скомпонованные в едином корпусе, и передает данные по радиосвязи в приемник сигналов – базовый модуль, который содержит контроллер управления, передающий собранные данные, поступающие по радиосвязи от модульных радиомикрофонов, в компьютер (Федоров и др., 2020).

На третьем этапе (2014–2015 г.) комплекс был значительно модернизирован с целью повышения оперативности обработки данных и поиска фрагментов. Для этого в состав комплекса был введен беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Инфразвуковые станции устанавливаются в фиксированных точках вблизи района падения, оснащаются источниками питания, гарантирующими 3 года автономной работы станций. Запуск станций в режим записи производится при помощи команд, передаваемых с БПЛА, с его же помощью производится последовательный сбор данных с инфразвуковых станций и передача их в центр обработки, где при помощи специального программного обеспечения рассчитываются координаты возможных мест падения и выдаются целеуказания на борт БПЛА, который облетает районы с указанными координатами, передавая в режиме online фото и/или видеоинформацию. БПЛА дополнительно оборудован инфракрасной камерой для обнаружения мест возможного возгорания и/или еще не остывших фрагментов. Схема работы такого комплекса приведена на рисунке 4. Это потребовало существенно переработать как аппаратную, так и программную часть комплекса. Основу комплекса составляет полевая аппаратура мониторинга (ПАМ), предназначенная для синхронного добывания (регистрации и накопления) информации об инфразвуковой обстановке в зоне ее расположения (района падений 1-й или 2-й ступеней ракет-носителей) в заданный с автоматизированного пункта управления период времени; первичной обработки координатной информации; формирования файлов исходных данных для расчета координат точек падения фрагментов ракет-носителей; передачи файлов исходных данных на борт БПЛА по радиоканалу (Авраамов и др., 2016).



Рисунок 4. Схема работы комплекса инфразвуковой локации мест падения фрагментов ракет-носителей

ПАМ состоит из трех (для района падений 1-й ступени) или шести (для района падений 2-й ступени) полевых станций мониторинга (ПСМ), структурная схема которой приводится на рисунке 5. Каждая из ПСМ имеет в своем составе 3 модуля – один аппаратно-программный модуль мониторинга «ведущий» (АПММ-1) и два аппаратно-программных модуля мониторинга «ведомых» (АПММ-2). Каждый блок имеет свой микропроцессор, обеспечивающий синхронизацию модулей между собой и переход в один из трех режимов работы – режим сна, режим ожидания или режим выполнения задания. Назначение элементов ПСМ приведено в таблице 1.

Элемент	Назначение
Muumahau	Преобразование звуковых волн в пропорциональные им коле-
микрофон	бания аналогового напряжения
$\Lambda IIII + GPS \Gamma_{HOHACC}$	Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму, их
АЦП + OI S-I Лонасс	координатная и временная привязка
	1. Организация сеанса записи данных, получаемых с микро-
	фона, и непосредственная передача их на центральный
	модуль управления.
Приёмо-передатчик	2. Хранение данных последней записи в долговременной
420/440 МГц +	памяти.
модуль управления	3. Обмен командами с центральным модулем управления
(устанавливается на	(ведущим) и выдача телеметрии.
ведомых АПММ)	4. Передача данных посредством радиосигналов от ведущего
	модуля к ведомым и в обратном направлении.
	5. Приём и интерпретация команд управления через радиомо-
	дем информационно-технического сопряжения с БПЛА

Таблица 1. Назначение элементов ПСМ

Элемент	Назначение					
Центральный	Хранение до 18 файлов записей в долговременной памяти					
накопитель						
	1. Передача по запросам центрального модуля управления					
	данных последней записи через приёмо-передатчики.					
	2. Получение через приёмо-передатчики 420/440 МГц данных					
	на ведущий модуль от модулей управления ведомых.					
	3. Отправка команд на модули управления ведомых.					
	4. Обмен командами с центральным накопителем и выдача те-					
	леметрии.					
	5. Управление режимами работы комплекта ПАМ (установка					
Центральный модуль	задания, считывание данных и т. д.).					
управления – вычис-	6. Передача через радиомодем информационно-технического					
литель (устанавлива-	- сопряжения с БПЛА статусной информации о состоян					
ется на ведущем	ведомых и ведущего АПММ.					
AПMM)	7. Приём через радиомодем информационно-технического					
	сопряжения с БПЛА команд управления и трансляция их на					
	центральный модуль управления.					
	8. Выдача на центральный накопитель общего файла послед-					
	ней записи со всех 3-х микрофонов.					
	9. Предварительная обработка зарегистрированных данных,					
	автоматическое выделение (детектирование) импульсных					
	сигналов в заданном диапазоне частот, формирование файлов					
	с результатами детектирования.					
	1. Реализация алгоритмов гарантированной доставки через ра-					
	диомодем информационно-технического сопряжения с БПЛА					
Радиомодем инфор-	необходимого файла записи.					
мационно-техничес-	2. Передача данных, записанных на центральном накопителе					
кого сопряжения	и/или файлов с результатами автоматического детектирова					
с БПЛА	ния в радиолинию.					
	3. Приём команд управления, переданных в радиолинию, с					
	центрального пункта управления на центральный накопитель.					



Рисунок 5. Структурная схема комплекта ПСМ

Для осуществления задач по передаче данных с ПСМ в центр обработки, а также фото-, видео- и тепловизионного наблюдения местности и объектов на фоне подстилающей поверхности земли, в состав комплекса был введен БПЛА. В данном комплексе был использован БПЛА «Орлан-10» производства ООО «Специальный технологический центр» (г. Санкт-Петербург). Основным его преимуществом является время автономного полета свыше 12 часов и радиус действия радиоканала не менее 60 *км*, что позволяет его использовать, как в районах падения 1-х ступеней, так и в районах падения 2-х ступеней ракет-носителей, которые значительно больше по площади.

В Главе 3 описываются основные алгоритмы, используемые для выделения инфразвуковых сигналов от движущихся источников, приводится обоснование методики пеленгации движущихся целей, освещается концептуальная структура программной части ПАК с разъяснением предназначения основных программ, входящих в состав комплекта.

Раздел 3.1 посвящен описанию алгоритма и методики детектирования многочисленных импульсных инфразвуковых сигналов.

Задача надежного детектирования (выделения) сигналов на уровне шума решается для различных физических полей по-разному. В основе детектирования инфразвуковых сигналов, зарегистрированных группами из нескольких разнесенных датчиков, лежит представление инфразвукового сигнала в виде плоской волны. Поскольку длина инфразвуковой волны, составляющая десятки и сотни метров, сопоставима или даже больше расстояний между датчиками (элементами инфразвуковой группы), то сигнал на разных сенсорах является идентичным с точностью до временных задержек прихода волны на датчики группы, которые легко рассчитать. В мировой практике для детектирования обычно используют частотно-волновой анализ (F-K анализ (Smart, Flinn, 1971)) или метод взаимной корреляционной функции (PMCC – Progressive Multichannel Correlation (Cansi, 1995)), использующие сложные вычислительно затратные алгоритмы расчета. Для ускорения решения задачи детектирования был разработан и реализован алгоритм, основанный на методе «beamforming», т.е. на суммировании записей отдельных датчиков со сдвигами, зависящими от предполагаемых азимутов на источник и кажущейся скорости прихода сигнала (Асминг и др., 2008, 2009).

Для первичного обнаружения импульсных сигналов используется алгоритм, подобный известному алгоритму STA/LTA для сейсмических записей, но с симметричным шаблоном. Идея его заключается в том, что отдельно считается средняя амплитуда для отсчетов, попавших в широкие временные окна (LTA) и в узкое временное окно (STA), а затем их отношение, которое обозначим как SNR (условно – отношение сигнал/шум). Моменты времени, в которые отношение *SNR* достигает локального максимума, причем этот максимум больше некоторого порога, считаются срабатываниями детектора. Для детектирования инфразвуковых волн ударного типа экспериментальным путем подобраны оптимальные полуширины окон LTA – 1 *с* и STA – 0.1 *с*. Первичное детектирование проводится по записи одного выбранного канала (предварительно отфильтрованной в полосе 5–50 *Г* μ).

Для того, чтобы проверить достоверность срабатывания, а также вычислить азимут и кажущуюся скорость сигнала, используется кросс-корреляция каналов. Поскольку каналов немного, а возможные значения временных сдвигов сигналов между каналами ограничены величиной $\Delta t_{max} = D_{max}/V_{min}$, где D_{max} – максимальное расстояние между датчиками, а V_{min} – минимальная скорость звука (в нашем случае $\Delta t_{max} \approx 200 \ m/300 \ m/c = 0.67 \ c$), кросс-корреляции считаются прямым перебором сдвигов между каналами с шагом в 1 отсчет.

Т.е., рассчитывается кросс-корреляция каналов $C(s_1,s_2)$, где s_1 – сдвиг первого канала относительно опорного (того, по которому производилось детектирование), а s_2 – сдвиг второго канала опорного:

 $C(s_1, s_2) = (Corr(f_0(t), f_1(t+s_1)) + Corr(f_0(t), f_2(t+s_2) + Corr(f_1(t+s_1), f_2(t+s_2))) /3, \quad (1)$ где $f_i(t)$ – запись *i*-го канала.

Если максимальное значение $C(s_1, s_2)$ превышает определенный порог, сигнал считается обнаруженным, а по значениям s_1, s_2 , на которых был достигнут максимум, рассчитываются азимут на сигнал и кажущаяся скорость подхода волны.

Если количество сигналов большое (как обычно бывает при снижении фрагментов 2-х ступеней ракет-носителей), то возникают случаи, когда сигналы (импульсы) следуют через небольшие интервалы времени, а формы и амплитуды записей этих импульсов очень похожи (т.к. сгенерированы однотипными фрагментами, летящими рядом друг с другом). В этом случае возникает ситуация, когда для двух различных импульсов, обнаруженных на одном канале, детектор автоматически подбирает одни и те же соответствия на других каналах, то есть, возникают перекрытия (рисунок 6 а). Для коррекции такой ситуации в программу детектирования встроена интеллектуальная система устранения перекрытий. В случае обнаружения перекрытия перебором максимизируется произведение кросс-корреляций сразу по 4-м сдвигам $C_1(s_1, s_2) \cdot C_2(s_3, s_4)$, причем сдвиги перебираются только те, которые не дают перекрытий. В результате двойные перекрытия успешно устраняются (Рисунок 6 б).



Рисунок 6. Детектирование с перекрытием (а) и результат его устранения (б)

Для улучшения детектирования в процедуру включено также сравнение экспериментальных амплитуд сигналов (Асминг и др., 2016). Для какого-либо фрагмента с достаточной точностью нельзя оценить амплитуды прихода импульсов на станции, из-за того, что не известна масса этого фрагмента. Но пропорциональные этим амплитудам величины оценить возможно. Наборы значений, пропорциональные теоретическим амплитудам сигналов, порожденных пролетом одного фрагмента, на разных станциях, сравниваются с экспериментальными амплитудами. Сигналы с близкими амплитудами на всех 3 микрофонах используются при принятии решения о их соответствии тому или иному фрагменту. **В разделе 3.2** приводится описание методики расчета распространения инфразвуковых сигналов в атмосфере.

Любой объект, движущийся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью, порождает ударную волну. В первые секунды ударные волны распространяются со скоростями, превышающими скорость звука, однако затем вырождаются в звуковые, поэтому для расчетов их распространения можно применять приближение лучевой акустики и использовать уравнения, принятые в геометрической акустике. Тогда можно ввести понятие о лучах как о линиях, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением распространения волны, и можно говорить о распространении инфразвука вдоль лучей, отвлекаясь при этом от его волновой природы. В первом приближении можно считать, что при движении через атмосферу со сверхзвуковой скоростью объект порождает звуковую волну в каждой точке своей траектории. Система этих звуковых волн в результате интерференции, в соответствии с принципом Гюйгенса, образует так называемый конус Маха. Очевидно, что при движении объекта по криволинейной траектории и с меняющейся скоростью форма поверхности Маха будет более сложной, чем идеальный конус.

Введем обозначения: φ – широта, λ – долгота, h – высота точки над поверхностью Земли (Асминг и др., 2021). Траекторию движения некоего объекта будем обозначать как тройку { $\varphi(t)$, $\lambda(t)$, h(t)}, t – время. Обозначим время пробега звука из точки (φ_1 , λ_1 , h_1) в точку (φ_2 , λ_2 , h_2) как $TT(\varphi_1, \lambda_1, h_1, \varphi_2, \lambda_2, h_2)$. Тогда звук, порожденный точкой траектории в момент времени $t_{\text{отрыва}}$, дойдет до станции в момент времени $t_{\text{прихода}}(t_{\text{отрыва}})$:

$$t_{\text{прихода}}(t_{\text{отрыва}}) = t_{\text{отрыва}} + TT(\phi_{\text{st}}, \lambda_{\text{st}}, h_{\text{st}}, \phi(t_{\text{отрыва}}), \lambda(t_{\text{отрыва}}), h(t_{\text{отрыва}}))$$
(2)

Время прихода самого первого звука на станцию:

$$t_0 = \min_{t_{\text{отрыва}}} (t_{\text{отрыва}} + TT(\phi_{\text{st}}, \lambda_{\text{st}}, h_{\text{st}}, \phi(t_{\text{отрыва}}), \lambda(t_{\text{отрыва}}), h(t_{\text{отрыва}})))$$
(3)

А интервал времен отрыва можно оценить из соотношения

$$\left| t_{\text{прихода}}(t_{\text{отрыва}}) - t_0 \right| < \delta \tag{4}$$

где δ – задаваемая характерная длительность импульса (в данной работе принята величина 0.1 *c*). Таким образом, если известны траектория движения объекта и времена пробега звука между точками, можно рассчитать время прихода звукового импульса на станцию и азимут (точнее, интервал азимутов) этого прихода, а также оценить кажущуюся скорость и, следовательно, угол прихода относительно горизонта.

Для оценки времени прихода звуковой волны с траектории пролета фрагмента, согласно (2), вычисляется время пробега звука от источника до приемника $TT(\varphi_1, \lambda_1, h_1, \varphi_2, \lambda_2, h_2)$. Для упрощения расчетов будем считать, что температура, плотность и скорость ветра в районе падения фрагментов ракетносителей зависят только от высоты, ветер является строго горизонтальным, а высота расположения приемника мала по сравнению с высотой источника $(h_2 << h_1)$, что не противоречит реальности. В таком приближении время пробега зависит только от азимута из источника на приемник, расстояния между ними и разности высот: $TT(\varphi_1, \lambda_1, h_1, \varphi_2, \lambda_2, h_2) \approx TT(\text{dist}(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2), \alpha, h_1-h_2)$, где dist – расстояние между проекциями точек на поверхность Земли, α – азимут из источника на приемник.

На следующем этапе расчет функции $TT(d, \alpha, h)$ производится в приближении лучевой акустики методом трассировки лучей (raytracing). Расчет сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{r}}{dt} = c \cdot \vec{n} + \vec{u} \\ \frac{d\vec{n}}{dt} = (\vec{n}, \nabla V) \cdot \vec{n} - \nabla V \\ V = c + (\vec{n}, \vec{u}) \end{cases}$$
(5)

где r – радиус-вектор точки на луче, n – нормаль к фронту волны, c – скорость звука, u – скорость ветра.

Таким образом, для трассировки распространения звука нужно знать температуру, скорость и направление ветра. Эту информацию можно получить различными способами – по результатам локального зондирования атмосферы; по данным полученных из распространенных моделей атмосферы; используя комбинацию этих двух моделей. Для расчета времен пробега звуковой волны из точек, расположенных на определенных высотах, в различные точки земной поверхности разработана программа RayVelMod (Виноградов, Асминг, 2017). Программа производит численное интегрирование системы уравнений (5), выбирая в качестве начальных условий точки с координатами (0,0,h) и направляя нормаль n в начале интегрирования в направлении угла азимута α и тангажа θ (угла с вертикалью). Программа перебирает значения высот, азимутов и тангажей и производит трассировку до тех пор, пока луч не упрется в дневную поверхность или не уйдет за пределы области интегрирования (рисунок 7). Лучи, отраженные от поверхности земли, отбрасываются как ненужные, чтобы не усложнять дальнейшие расчеты.



Рисунок 7. Трассировка лучей для источника звука на высоте 30 *км* при использовании модели стандартной атмосферы

В разделе 3.3 приводится описание методики определения мест падения фрагментов ОЧ РН.

Для корректного решения задачи локации производятся следующие математические операции (Асминг и др., 2016):

– моделирование распада аппарата;

– моделирование движения фрагментов в атмосфере;

– моделирование распространения звука в атмосфере;

 – сравнение экспериментальных и теоретических параметров инфразвуковых сигналов.

Движение любого объекта в атмосфере Земли определяется простым уравнением

$$\vec{a} = \vec{g} + \vec{a}_{\text{Кориолиса}} - \rho(\vec{v} - \vec{v}_{\text{ветра}}) \left| \vec{v} - \vec{v}_{\text{ветра}} \right| SC_{x}(m)$$
(6)

где ρ – плотность атмосферы, a – ускорение, v – скорость, $C_x(m)$ – аэродинамическое сопротивление, m – скорость в Махах, S – аэродинамический коэффициент, зависящий от формы объекта. Функция $C_x(m)$ – аэродинамическое сопротивление – слабо зависит от формы движущихся объектов. Варьируя начальные условия – векторы координат и скоростей в начальный момент времени, баллистический коэффициент и интегрируя уравнение (6), можно получить все в принципе реализуемые траектории движения объекта.

Для локации мест падения фрагментов применяется метод подбора. Для этого, путем изменения параметров $V_{\text{ветра}}$ и *S*, входящих в формулу (6), рассчитывается большой набор траекторий, которые в принципе могут реализоваться (так называемая «трубка траекторий»). С этой целью берется проектная траектория, рассчитанная баллистиками и направленная в центр района падения, на ней фиксируется точка, в которой предполагается, что в ней объект еще движется в соответствии с теоретическими расчетами. Далее предполагается, что при входе в плотные слои атмосферы объект делится на фрагменты с различными баллистическими коэффициентами, т.е. ниже высоты H_0 объект разрушается (рисунок 7).

В момент разрушения объект перестает двигаться как единое целое и распадается на несколько фрагментов, каждый из которых имеет свой баллистический коэффициент *S*. Изменение параметра *S* позволяет искривлять траекторию движения в направлении «вперед-назад». Параметр *S* задается близким к реальному и его значения ограничиваются минимальными и максимальными величинами, полученными по результатам физического моделирования. Изменяя вектор $V_{\text{встра}}$, производится смещение траектории в направлении «вперед-назад». Таким образом, для каждого нового фрагмента может быть рассчитана своя уникальная траектория. В результате формируется «трубка траекторий», концы которой покрывают с запасом весь район предполагаемого падения фрагментов с заданным шагом. Шаг определяется необходимой точностью и требуемой скоростью расчетов. Программа расчета ограничена числом 999.999 траекторий, что в большинстве случаев является избыточным.



Рисунок 7. Схема распространения инфразвуковых сигналов до станций наблюдения от одной траектории из «трубки траекторий»

Используя методику распространения сигнала с учетом параметров атмосферы (программа RayTracing), от каждой теоретической траектории, входящей в «трубку», рассчитываются теоретические времена, азимуты и кажущиеся скорости прихода инфразвуковых сигналов на станции, местоположение которых известно. Экспериментальные времена приходов инфразвуковых сигналов, азимуты и кажущиеся скорости, вызванные реальным пролетом фрагментов снижающейся ступени ракеты-носителя, получаются в ходе реальных наблюдений. Для сравнения пары приходов на одну станцию – экспериментального (измеренного в ходе проведения наблюдений, $p_{эксп}$) и теоретического (рассчитанного по одной из траекторий трубки, $p_{теор}$) используется следующий алгоритм:

пусть $p_{3\kappaсп}=(t_1, \alpha_1, v_1)$ – время, азимут и кажущаяся скорость экспериментального прихода, $p_{\text{теор}}=(t_2, \alpha_2, v_2)$ – те же параметры теоретического прихода. Для сравнения выработана функция $R(p_{3\kappaсп}, p_{\text{теор}})=R(t_1, \alpha_1, v_1, t_2, \alpha_2, v_2)$, которая в случае принципиальной разницы параметров обращается в 0, а в случае идентичности параметров – в 1. Для этого оцениваем четыре параметра – расхождение времени, расхождение кажущейся скорости, расхождение азимута, расхождение амплитуд.

Для сравнения экспериментальных и теоретических амплитуд используется следующий алгоритм. Как было отмечено выше, реальные значения теоретических амплитуд вычислить невозможно, поэтому используются величины, им пропорциональные. Другими словами, имеется набор эксперимен-

тальных амплитуд $\{A_i\}$ и теоретических оценок $\{T_i\}$ (*i*-индекс группы), которые в случае совпадения должны иметь высокий коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции между двумя этими группами параметров можно считать оценкой сходства.

Обозначим эту оценку как R_A =Correlation({ A_i }, { T_i }). В качестве простого примера рассмотрим процедуру оценки рейтинга по какой-либо одной траектории из «трубки траектории». Обозначим расчетный приход с этой траектории на станцию *s* как r_s . Пусть расчетное время прихода сигнала с этой траектории на станцию s равно $t_{s,pacчет}$. Выберем все экспериментальные приходы на эту станцию такими, что $|t_{s,pacчет}-t_i| < \Delta t_{max}$, где t_i – время экспериментального прихода. Далее создадим множество всех возможных приходов на станцию *s*, включив в него все выбранные экспериментальные приходы плюс пустой приход. Обозначим это множество P_s .

Введем термин «вариант». «Вариантом» будем называть множество экспериментальных приходов на все станции $V=\{p_1, p_2, ..., p_N\}$, (N - количество станций) таких, что $p_1 \in P_1, p_2 \in P_2 ... p_N \in P_N$, выбранных для данной траектории (Виноградов, Асминг, 2017). В это множество для некоторых станций могут входить и пустые приходы (т.е. отсутствия приходов на данные станции). Каждый «вариант» будет характеризоваться набором экспериментальных амплитуд $\{A\}$. Набор теоретических амплитуд $\{T\}$ вычисляется для траектории в целом и не зависит от рассматриваемого варианта.

Оценивать «вариант» будем по его рейтингу, рассчитываемому по формуле:

$$R(V) = R_{A}(\{A\},\{T\}) \cdot \prod_{s} R(p_{s},r_{s})$$
(7)

Таким образом, рейтинг «варианта» – это оценка сходства набора экспериментальных амплитуд данного «варианта» с теоретическими, умноженная на оценки сходства всех экспериментальных приходов «варианта» с теоретическими. За окончательный рейтинг траектории выбирается максимум из оценок всех возможных вариантов R(V). Приходы, которые участвовали в этом окончательном варианте, будут считаться ассоциированными с данной траекторией.

В результате для того чтобы оценить каждую траекторию из «трубки траекторий» выполняется следующая процедура: рассчитывается рейтинг для

каждой траектории из трубки; затем выбирается трасса с максимальным значением рейтинга; экспериментальные приходы на каждой станции, которые были проассоциированы с реализовавшейся траекторией, удаляются из списка; затем процедура повторяется, т.е. ищется следующая траектория, но уже используется меньшее количество экспериментальных приходов; отбираются траектории с максимальным рейтингом до тех пор, пока экспериментальные приходы не будут исчерпаны. Местами возможного падения фрагментов будут точки пересечений траекторий с самым высоким рейтингом с поверхностью земли. Координаты мест возможного падения вычисляются автоматически с учетом известных высот рельефа.

Раздел 3.4 посвящен описанию программ, входящих в состав комплекса.

Для реализации описанных выше алгоритмов инфразвуковой локации был разработан специализированный программный комплекс (Виноградов, Асминг, 2017) состоящий из программы подготовки атмосферных данных МА, программы трассировки звука через атмосферу RAYVELMOD; программы детектирования импульсных сигналов IMPDET, программы генерирования и подбора траекторий СТ, программы-интегратора IPL для автоматизации процесса обработки за счет упрощенного обмена данными между всеми программами комплекса. Однако каждая программа комплекса может запускаться и автономно. Структура комплекса показана на рисунке 8.



Рисунок 8. Структура программного комплекса пассивной инфразвуковой локации

Входными данными для комплекса обработки являются волновые формы инфразвуковых групп, теоретическая траектория движения ступени на

пассивном участке, натурные и/или модельные данные об атмосфере в районе проведения работ. Далее программа управления комплексом (IPL) последовательно запускает программы выполняющие следующие действия:

- TEMPMODEL создает пакет модели температуры;

- WINDMODEL создает пакет модели ветра;

– МА – создает полный пакет атмосферы, сохраняет исходную траекторию;

 – IMPDET – выделяет инфразвуковые сигналы из волновых форм, определяет параметры инфразвуковых сигналов;

 – СТ – генерирует «трубку траекторий», производит сравнение экспериментальных и теоретических параметров инфразвуковых сигналов, рассчитывает предполагаемые координаты мест падений фрагментов;

 – RAYVELMOD - производит расчет времен пробегов звуковых волн от каждой траектории из «трубки» до инфразвуковых станций.

В разделе 3.5 описываются основные этапы создания и модернизации аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации.

При создании мобильного автономного аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации был применен известный метод последовательной детализации разработки.

На первом этапе создания комплекса (2009–2010 гг.) была разработана и прошла полный цикл испытаний на функциональность и надежность система регистрации и детектирования инфразвуковых сигналов, позволяющая определять времена их приходов к датчикам и азимуты на источники. Были проведены первые испытания методики детектирования и инфразвуковой локации в РП 1-й ступени на пуске PH «Протон».

На следующем этапе, в 2011–2012 гг., была осуществлена верификация системы регистрации сигналов от фрагментов верхних ступеней в ходе запусков РН «Протон-М» по новой трассе с наклонением 48°. На этом этапе было серьезно доработано программное обеспечение комплекса с целью возможности детектирования большого количества сигналов (до 100 в минуту) и ассоциирования сигналов, полученных с разных станций наблюдения, между собой. При этом достоверность получаемых результатов (расчетных мест падений фрагментов) обеспечивалась гарантированным обнаружением

всех фрагментов 2-й ступени и головного обтекателя ввиду удачного расположения РП исключительно в степной местности Республики Казахстан. На этом же этапе начала создаваться база данных, включающая различные параметры инфразвуковых сигналов, использование которой в дальнейшем позволило в оперативном режиме определять возможный тип источника генерации инфразвуковых сигналов по данным инфразвуковых наблюдений.

На третьем этапе (2012–2014 гг.) была разработана полевая часть мобильного автономного аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации в составе нескольких комплектов беспроводной полевой аппаратуры мониторинга. На этом же этапе была существенно расширена и модернизирована программная часть комплекса, получившая много дополнительных сервисных опций и много автоматизированных операций. В комплекты полевой аппаратуры были встроены микропроцессоры, управление работой всех элементов полевых станций мониторинга стало осуществляться по специально разработанным алгоритмам в рамках уникального программноматематического обеспечения.

На последнем этапе создания комплекса пассивной инфразвуковой локации (2014–2015 гг.) были разработаны такие уникальные элементы, как автоматизированная система передачи информации с использованием беспилотного летательного аппарата, система обеспечения автономности и автоматизированное рабочее место оператора комплекса. На этом этапе был реализован принцип дистанционного автоматизированного мониторинга районов падения ОЧ РН, состоящий в том, что полевая аппаратура мониторинга устанавливается в РП заблаговременно и на протяжении длительного времени (2– 3 года) поддерживается в рабочем состоянии в автономном режиме, а понятие «дистанционный» подразумевает нахождение оператора автоматизированного рабочего места за пределами РП (т.е. на расстоянии десятков и сотен километров от полевых станций мониторинга).

В Главе 4 описаны результаты физического моделирования, проведенного в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, по определению аэродинамических характеристик типовых фрагментов конструкции ОЧ РН «Союз» и имитационного математического моделирования по распаду 1-й ступени. Описана методика создания базы данных инфразвуковых сигналов, генерируемых снижающимися фрагментами отделяющихся ступеней ракет-носителей.

Для более точного расчета полей рассеяния фрагментов в РП необходимо детально знать параметры атмосферы и точные аэродинамические характеристики фрагментов, достигающих земной поверхности. С этой целью в 2013–2014 гг. в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского было проведено физическое моделирование для определения аэродинамических коэффициентов типовых фрагментов 1-й ступени PH «Союз» (Пирогов и др., 2018). Типовые фрагменты конструкции ОЧ PH были изготовлены в виде масштабных моделей, а затем последовательно продувались в аэродинамической трубе под разными углами. Как правило, выбирались 3 условных направления («спереди», «сзади» и «сбоку»). Такой подход вполне приемлем в силу наличия у большинства элементов ОЧ PH осевой симметрии. Это позволило определить значения максимального, среднего (номинального) и минимального значения коэффициентов лобового сопротивления для каждого элемента. Результаты представлены в таблице 2.

Фрагмент/ Площадь	Фотография модели	Вид значения	Аэродинамический коэффициент	
поперечного сечения, м-			<i>M</i> <1	<i>M</i> >1
Хвостовой отсек		Мин	0,1	0,2
3,41		Средн	0,46	0,84
		Макс	0,98	1,55
ТНА двигателя 0,352565	(CER)	Мин	1,019	1,832
		Средн	1,321	2,269
	A CONTRACTOR	Макс	1,623	2,705
Камера двигателя 0,40715		Мин	0,395	0,72
		Средн	1,351	2,283
		Макс	2,307	3,846
Агрегатный отсек		Мин	0,098	0,19
3,41		Средн	0,45	0,83
		Макс	0,98	1,54

Таблица 2. Значения аэродинамических коэффициентов (S) лобового сопротивления элементов ОЧ РН 1-й ступени РН «Союз» (по Пирогов и др., 2018)

Фрагмент/ Площадь	Фотография модели	Вид значения	Аэродинамический коэффициент	
поперечного сечения, м			<i>M</i> <1	<i>M</i> >1
Бак перекиси		Мин	0,7	1,36
водорода 2,155996	0 0	Средн	0,837	1,492
		Макс	0,975	1,625
Бак жидкого азота		Мин	0,356	0,594
2,155996		Средн	0,628	1,03
		Макс	0,9	1,466
Бак окислителя	\wedge	Мин	2,098	0,882
6,75	N/	Средн	2,877	4,037
		Макс	4,315	7,192
Бак горючего 3,41		Мин	1,058	1,82
		Средн	3,938	6,592
		Макс	6,818	11,364

Выяснилось, что оценки параметра *S*, рассчитываемые разработанным программным комплексом, хорошо коррелируют с параметром *S*, полученным в ходе физического моделирования. В результате была создана база данных фрагментов, их волновых форм и параметра *S*. Всего в базе данных имеется информация о 486 найденных фрагментах ракет-носителей «Протон» и «Ангара». Также в базе хранятся сведения о метеорологических условиях в местах наблюдений и записи волновых форм. База данных постоянно пополняется и расширяется по мере проведения новых пусков. Использование этой базы данных позволяет по результатам инфразвукового мониторинга без осуществления наземного поиска идентифицировать тип фрагмента (элементы обечаек, двигателей, обтекателя и т.д.). Это позволяет с минимальными затратами набрать объем статистических данных, достаточный для реализации мероприятий по уменьшению площадей районов падения с одной стороны, и существенно упростить планирование и организацию работ по очистке районов падений от упавших фрагментов.

В Главе 5 приводятся некоторые примеры практического применения мобильного автономного аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации и технологии инфразвуковой локации для определения мест падения снижающихся фрагментов 1-й и 2-й ступеней ракет-носителей в штатных районах падения.

В течение 2009–2014 гг. производилась отладка технологии инфразвуковой локации снижающихся фрагментов первой и второй ступеней ракет-носителей на 14 реальных пусках ракет-носителей «Протон», «Союз» и «Ангара» в которых автор работы принимал непосредственное участие. В главе 5 приведены 7 примеров работы комплекса инфразвуковой локации, имевшие наиболее интересные результаты. В автореферате рассмотрен лишь один из наиболее важных и ответственных экспериментов.

В период с 19.12.2014 г. по 25.12.2014 г. были проведены работы по проверке мобильного автономного аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации для определения мест падения фрагментов первой ступени РН «Ангара–А5.1Л» в штатном районе падения «Вуктыл» (Республика КОМИ). Для регистрации сигналов было установлено 4 полевых станции мониторинга из состава ПАМ и дополнительно была установлена мобильная инфразвуковая группа (МИГ), разработанная в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН. Пакет атмосферы включал в себя профиль температуры, рассчитанный по глобальной модели NRL-MSISE-00, и профиль горизонтального ветра, рассчитанный по глобальной модели HWM-93.

Волновые формы записанных сигналов приведены на рисунке 9. Анализируя записи, можно увидеть, что на станции VOR, находившейся в самой западной части РП, записано 4 четких сильных импульса длительностью около 1 *с* каждый, аналогичные сигналам, наблюдавшимся ранее при регистрации сигналов от падений первых ступеней PH «Протон» и «Союз». Записанные импульсы практически тождественны как по интенсивности, так и по спектру. Это свидетельствует о том, что инфразвуковые сигналы, были сгенерированы четырьмя крупными фрагментами. Записи же остальных 4 ПСМ, находившихся в центральной и восточных частях РП, резко отличаются от тех, что записала станция VOR – на них наблюдаются более слабые и более высокочастотные импульсы, причем число импульсов кратно возрастает на станциях, расположенных в более восточной части РП. Аналогичные сигналы наблюдалась ранее при регистрации сигналов от падений вторых ступеней PH «Протон». Такая разница в сигналах позволила предположить, что снижающаяся ступень распалась на большое количество более мелких фрагментов, причем это произошло уже после того, как были сгенерированы сигналы, пришедшие на станцию VOR. По полученным записям можно сделать еще одно важное наблюдение. На записях станций PSM1-PSM4 вначале идут четкие, резкие импульсы, а затем, через 20-30 c – область повышенной амплитуды инфразвука, в которой только иногда можно различить отдельные импульсы. Эти области связаны с тем, что движение большой массы мелких фрагментов с высокими значениями баллистического коэффициента вызывает большое количество близких по времени сигналов, суперпозиция которых и наблюдается на записях (выделено желтым на рисунке 9).



Рисунок 9. Сводная регистрограмма по всем 5 станциям мониторинга (представлен только 1 канал по каждой станции). Желтым выделены зоны суперпозиции инфразвуковых сигналов, т.е. зоны, где снижалось очень большое количество фрагментов

Результаты определения мест падений фрагментов по данным инфразвуковой локации и найденных в результате обследования РП фрагментов представлены на рисунке 10. Координаты фрагментов, обозначенные на рисунке как «Группа фрагментов 1», хорошо совпали с координатами найденных фрагментов двигательных установок, имеющих достаточно большую массу и низкий баллистический коэффициент. В то же время, программа автоматической локации не смогла подобрать траектории, соответствующие фрагментам из групп 2 и 3 (рисунок 10). Этими фрагментами оказались мелкие (площадью менее $0.6 M^2$) обломки корпуса и баков. Вероятно, чтобы произвести локацию таких фрагментов, необходимо станцию KPSM4 разместить ближе к РП, сместив ее в сторону центра. Кроме того, легкие фрагменты более подвержены влиянию приземного ветра, следовательно, поправку на наземный ветер необходимо будет учитывать в дальнейшем при расчетах. Смещение «группы фрагментов 2» относительно траектории в целом соответствует модельным направлениям ветра во время пуска.



Рисунок 10. Сравнение результатов локации (подбора траекторий) программы СТ и реально найденных фрагментов ОЧ РН «Ангара» при ее запуске с космодрома «Плесецк» в декабре 2014 г.

По волновым формам и результатам подбора удалось определить параметры разрушения ступени. Сигналы на самую западную станцию МИГ, пришли с высоты примерно 24.3 км. Станция зарегистрировала 4 мощных инфразвуковых сигнала, соответствующие 4 двигательным установкам. На станцию KPSM1 сигналы дошли с высоты примерно 12.1 км. Станция зарегистрировала 8 относительно сильных сигналов, соответствующих распавшимся двигательным установкам, и облако суперпозиции сигналов, связанное с большим количеством мелких фрагментов общивки корпуса 1-й ступени РН «Ангара-А5.1Л». На станцию KPSM2 сигналы дошли с высоты примерно 11 км. Станция зарегистрировала 16 относительно сильных сигналов, соответствующих распавшимся двигательным установкам, и облако суперпозиции сигналов, связанное с большим количеством мелких фрагментов общивки корпуса 1 ступени РН «Ангара-А5.1Л». На станцию КРЅМЗ сигналы дошли с высоты примерно 10 км. Станция зарегистрировала более 25 относительно сильных сигналов, соответствующих распавшимся двигательным установкам, и облако суперпозиции сигналов, связанное с большим количеством мелких фрагментов обшивки корпуса 1 ступени РН «Ангара–А5.1Л». Т.е. можно сделать вывод, что распад 1-й ступени РН «Ангара–А5.1Л» начался на высоте ниже 24 км, но выше 12 км. Ниже 12 км начался интенсивный распад как двигательных установок, так и корпуса РН. Эти данные очень важны для планирования последующих мест падений фрагментов и послужат основанием для уменьшения площади РП.

Все обнаруженные фрагменты ОЧ РН были каталогизированы, наиболее крупные, найденные вблизи расчетных точек падений были внесены в базу данных волновых форм фрагментов ракет-носителей. В расчетном районе, полученном с использованием полевой аппаратуры мониторинга системы инфразвуковой локации были обнаружены фрагменты двигательных установок. Погрешность отклонения фактических координат от расчетных составила 0.7–2 *км*.

В заключении делаются основные выводы по результатам работы и рассматриваются перспективы по ее возможному применению и развитию.

В диссертационной работе описан аппаратно-технический и программно-математический состав мобильного автономного аппаратно-программного комплекса пассивной инфразвуковой локации, разработанного и внедренного в состав измерительных средств, обеспечивающих безопасность при проведении пусков ракеты-носителя нового типа «Ангара». Применение комплекса в районах падений 1-х и 2-х ступеней ракет-носителей разного типа позволяет гарантировано определять места падения фрагментов этих ступеней. Наличие такого комплекса позволило предложить новый эффективный метод инфразвуковой пеленгации движущихся в атмосфере объектов, позволяющий с использованием 2-х и более мобильных инфразвуковых групп, надежно определять места падений, как одиночных, так и летящих группой многочисленных объектов, снижающихся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью. Данный метод был впервые применен для целей ракетно-космической отрасли, доказав свою высокую эффективность. Применение разработанного метода позволяет в несколько раз уменьшить площади поиска упавших фрагментов ракет-носителей, существенно снизив временные и материальные затраты поисковых групп.

Совокупность результатов работы содержит новое и своевременное решение научно-технической задачи, направленной на повышение эффективно-

сти ракетно-космической деятельности в России и вносит важный вклад в решение проблем экологии и охраны природы. Элементы, входящие в состав как технической, так и программной частей комплекса пассивной инфразвуковой локации, успешно используются для решения и других практических задач, таких как мониторинг откола айсбергов (Виноградов и др., 2021 а), мониторинг схода снежных лавин (Виноградов и др., 2021 б), определение места и причин катастрофы вертолета МИ-8 на архипелаге Шпицберген (Виноградов, Федоров, 2019). В целом, выполненная работа является оригинальной, а разработанные методы, математические модели и реализующие их программные комплексы и аппаратные средства удовлетворяют критериям новизны и существенных отличий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журналы, включенные в перечень ВАК:

- 1. Авраамов А.В., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Воронин Н.Н., Хохленко Ю.Л. Методика локации источников инфразвуковых колебаний // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. №5. С. 5–9.
- 2. Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Использование инфразвукового метода для мониторинга деструкции ледников в арктических условиях // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 5. С. 582–591.
- 3. Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов Ю.А., Воронин А.И. Сейсмоинфразвуковой мониторинг на Шпицбергене // Сейсмические приборы. – 2012. – Т. 48, № 3. – С.20–33.
- 4. Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Воронин А.И., Федоров А.В., Чигерев Е.Н., Роскин О.К. Поиск фрагментов ракет носителей инфразвуковым методом // Вестник НЯЦ РК. 2015. Вып. 4. С. 42–49
- 5. Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Воронин А.И., Федоров А.В., Чигерев Е.Н., Роскин О.Г. Определение мест падений фрагментов ракет-носителей по данным инфразвуковых наблюдений» // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 6. С. 707–715.
- 6. Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А., Кременецкая Е.О., Прокудина А.В. О результатах наблюдений на Апатитском сейсмо-инфразвуковом комплексе // Вестник МГТУ. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2008. Т. 11, № 3. С. 512–518.
- 7. Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Виноградов Ю.А. Калибровка скоростной модели Хибинского горного массива и прилегающей территории с помощью регистрации промышленных взрывов // Вестник МГТУ. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 71–177.
- Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 300–307.

- 9. Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2010. Т.13, № 4/2. С. 998–1007.
- 10. Асминг В.Э., Федоров А.В., Виноградов Ю.А., Чебров Д.В., Баранов С.В., Федоров И.С. Быстрый детектор инфразвуковых событий и его применение // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 1. С.54–67. DOI: 10.21455/gr2021.1-4
- Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Кременецкая Е.О., Петров С.И. Формирование системы сейсмологического и инфразвукового мониторинга в западной Арктике в XX веке и перспективы ее дальнейшего развития // Вестник КНЦ РАН. – 2012. – №4. – С. 145–163.
- 12. Виноградов Ю.А., Асминг В.Э. Применение методов инфразвуковой пеленгации и локации для определения мест падения фрагментов отработавших ступеней ракет-носителей // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, № 4. С. 5–25. DOI: 10.21455/SI2017.4-1
- Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Баранов С.В., Федоров А.В., Виноградов А.Н. Сейсмоинфразвуковой мониторинг деструкции ледников (пилотный эксперимент на архипелаге Шпицберген) // Сейсмические приборы. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 5 –14.
- 14. Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Катастрофа вертолета на архипелаге Шпицберген: дешифровка инфразвуковых и сейсмических сигналов // Геофизические процессы и биосфера. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 111–117.
- 15. Виноградов Ю.А., Федоров А.В., Баранов С.В., Асминг В.Э., Федоров И.С. О выделении айсбергообразующих льдотрясений по сейсмоинфразвуковым данным // Лед и Снег. 2021. Т. 61, № 2. С. 262–270. DOI: 10.31857/S2076673421020087
- Маловичко А.А., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А. Развитие систем геофизического мониторинга в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2014. № 2 (14). С. 16–23.
- 17. Провоторов Д.С., Соловьев А.В., Виноградов Ю.В. Амплитудно частотные характеристики инфразвуковых сигналов от наземных взрывов // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322, №2. С. 87–90.
- Asming V.E., Fedorov A.V., Vinogradov Yu.A., Chebrov D.V., Baranov S.V., Fedorov I.S. Fast infrasonic event detector and its application // Geophysical Research. 2021. V. 22, N 1. P. 54–67. DOI: 10.21455/GR2021.1-4
- 19. Vinogradov Y.A., Fedorov A.V. Helicopter crash on the Spitsbergen Archipelago: infrasound and seismic signals decryption // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2019. – V. 55, № 7. – C. 779–784. DOI: 10.1134/S0001433819070107

Журналы Web of Science и Scopus:

- Asming V.E., Baranov S.V., Vinogradov A.N., Vinogradov Yu.A., Fedorov A.V. Using an Infrasonic Method to Monitor the Destruction of Glaciers in Arctic Conditions // Acoustical Physics. – 2016. – V. 62, N 5. – P. 583–592. – DOI: 10.1134/S1063771016040035
- Asming V.E., Vinogradov Y.A., Voronin A.I., Fedorov A.V., Chigerev E.N., Roskin O.K. Determining places of falling of launch vehicle fragments using infrasonic observations // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – T. 52, № 6. – C. 629–636.
- Gibbons S.J., Asming V.E., Fedorov A.V., Fyen J., Kero J., Kozlovskaya E., Kværna T., Liszka L., Näsholm S.P., Raita T., Roth M., Tiira T., and Vinogradov Yu.A. The European Arctic: A laboratory for seismoacoustic studies // Seism. Res. Letters. – 2015. – V. 86, N 3. – P. 917–928. – DOI:10.1785/0220140230

- Kasatkina E. A., Shumilov O. I., Vinogradov Y. A., Vasilyev A. N. Spectral characteristics of atmospheric pressure and electric field variations under severe weather conditions at high latitudes // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions (ACPD). 2006. V. 6(2). P. 6613–6626
- 5. Vinogradov A., Asming V., Baranov S., Fedorov A., Vinogradov Yu. Joint seismoinfarsound monitoring of outlet glaciers in the Arctic: case study of the Nordenskiold outlet glacier terminus near Pyramiden (Spitsbergen) \\ 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings. Vol. III. Hydrology, Engineering Geology & Geothechnics, Applied and Environmental Geophysics, Oil and Gas Exploration. Albena, Bulgaria, 30 June – 6 Jule, 2016. Sophia: STEF92 Technology. – 2016. – P. 521–528. – DOI:10.5593/SGEM2016B13
- 6. Vinogradov Yu.A., Asming V.E. Detection of impact points of fragments of spent launch vehicle stages using infrasound direction-finding methods // Seismic Instruments. 2018. V. 54, N 4. P. 387–400. DOI:10.3103/S0747923918040102
- Vinogradov Yu.A., Asming V.E., Baranov S.V., Fedorov A.V., Vinogradov A.N. Seismic and Infrasonic Monitoring of Glacier Destruction: A Pilot Experiment on Svalbard // Seismic Instruments. 2015. V. 51, N 1. P. 1–7.
- Vinogradov Yu., Kozyrev A., Asming V. New 3D velocity model of the Khibiny and Lovozero mountain massifs for accurate location of Rock Bursts and explosions in underground mines and quarries // 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015 Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. – 2015. – P. 1051–1058.
- 9. Vinogradov Yu.A., Fedorov A.V. Helicopter crash on the Spitsbergen Archipelago: infrasound and seismic signals decryption // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55, N 7. C. 779–784. DOI: 10.1134/S0001433819070107
- Vinogradov Yu.A., Fedorov A.V., Baranov S.V., Asming V.E., Fedorov I.S. Identification of iceberg-forming ice quakes from seismic and infrasound data // Led i Sneg-Ice and Snow. – 2021. – V. 61, N 2. – P. 262–270. – DOI: 10.31857/S2076673421020087
- 11. Zhirov D., Vinogradov Yu., Zhirova A., Klimov S., Zhukova S. 3D-analysis of the rock burst taken place on 27/01/2016 at mining section 14 of the Kirovsk mine (Khibiny, Russia) // 17th

Патенты:

- 1. Патент на изобретение RU 2625206 C1, 12.07.2017. Способ доставки постановщиков помех и беспилотный робототехнический комплекс радиоэлектронной борьбы. / Авраамов А.В., Виноградов Ю.А., Воронин Н.Н., Золотов А.В., Смирнов П.Л., Хохленко Ю.Л., Шепилов А.М. – заявка № 2016117518 от 04.05.2016.
- 2. Патент на изобретение RU 2652914 C1, 03.05.2018. Способ наземной и воздушной доставки постановщиков радиопомех с использованием мобильного робототехнического комплекса радиоэлектронной борьбы / Авраамов А.В., Виноградов Ю.А., Воронин Н.Н., Куликов М.В., Смирнов П.Л., Хохленко Ю.Л. заявка № 2016117026 от 28.04.2016.
- 3. Патент на полезную модель RU 188799 U1, 23.04.2019. Устройство дистанционного сбора данных с удалённым доступом по спутниковой связи. / Виноградов Ю.А., Федоров И.С., Асминг В.Э. – заявка № 2018113555, 13.04.2018.
- Программный комплекс Acuda. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015618045 / Асминг В.Э., Виноградов Ю.А.; правообладатель: ФГБУН Геофизическая служба Российской академии наук – 2015611589 от 11.03.2015. – дата регистрации 29.07.2015, дата публикации: 20.08.2015