

На правах рукописи



МОРОЗОВ Алексей Николаевич

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ  
СЕТИ ПО РЕГИСТРАЦИИ ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИХ, РЕГИОНАЛЬНЫХ  
И ЛОКАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ  
(НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЕТИ)**

Специальность 25.00.10 – геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2009


Работа выполнена в Институте экологических проблем Севера Архангельского научного центра УрО РАН

- Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук,  
доцент  
**Французова Валентина Ивановна**
- Научный консультант:** член-корреспондент РАН, доктор  
физико-математических наук,  
Учреждение РАН Институт физики  
Земли  
**Николаев Алексей Всеволодович**
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Собисевич Леонид Евгеньевич**
- кандидат геол.-мин. Наук  
**Дружинин Владимир Степанович**
- Ведущая организация:** Институт геологии КарНЦ РАН  
( г. Петрозаводск)

Защита состоится 24 декабря 2009г. В 13 час. на заседании диссертационного совета Д 004.009.01 при Учреждении Российской академии наук в Институте геофизики УрО РАН по адресу: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики УрО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор  Хачай Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** С 1994 года, когда постановлением Президиума РАН были сформированы Геофизическая служба РАН (ГС РАН) и Геофизическая служба Сибирского отделения РАН, начался этап возрождения и развития сети сейсмических станций на территории РФ (*Маловичко и др., 2007*).

При активном содействии ГС РАН стали развиваться региональные сейсмические сети не только в сейсмоактивных регионах, но и на платформенных территориях, особенно на территории Восточно-Европейской платформы. Связано это с тем, что в настоящее время геолого-геофизические исследования земной коры вплотную подошли к проблеме изучения особенностей геодинамики платформ и блоков земной коры, как во внутренних частях, так и в зонах их сочленения. Исследование сейсмического режима территорий, считающихся по сейсмичности слабоактивными, представляется существенным и в связи с размещением на них промышленных и военных объектов особой важности (трубопроводов, АЭС, полигонов и др.).

Создание в 2003 году Архангельской сейсмической сети обусловлено тем, что до настоящего времени сейсмичность Севера Русской плиты, вызванная естественными и техногенными источниками, была изучена крайне слабо. При этом, непосредственно на территории Архангельской области сосредоточено большое количество крупных промышленных объектов: судоремонтные заводы, целлюлозно-бумажные и лесоперерабатывающие комбинаты, карьеры; нефте- и газопроводы, а также космодром «Плесецк» и ядерный полигон на о.Новая Земля (*Юдахин, Французова, 2004*).

По данным Архангельской сейсмической сети планируется детально изучить геологическую среду исследуемой территории, оценить возможность возникновения на территории наведенной сейсмичности вследствие антропогенного воздействия на среду, а также проведение сейсмического мониторинга экологических и техногенных катастроф в рамках решения задач «сейсмологии чрезвычайных ситуаций», которая будет осуществляться совместно с региональным отделением МЧС РФ (*Французова и др., 2007*).

Для выполнения поставленных задач необходимо прежде решить задачи, которые являются первоочередными для новых сейсмических сетей: оценка чувствительности сейсмических станций к регистрации землетрясений на региональных и телесеизмических расстояниях; создание способа (методики) распознавания взрывной сейсмичности по записям сейсмических станций, чтобы промышленные взрывы ошибочно не попали в каталог местных землетрясений; оценить возможности сети по регистрации экологических и техногенных катастроф.

Небольшой период времени функционирования сейсмической сети позволяет уже сейчас решать поставленные в рамках диссертационной работы задачи по оценке возможностей Архангельской сейсмической сети по регистрации сейсмических событий от естественных и техногенных событий на разных эпицентральных расстояниях в асейсмичном регионе.

Таким образом, оценке возможностей сейсмической сети по регистрации сейсмических событий на разных эпицентральных расстояниях, на примере Архангельской сейсмической сети, является актуальным и своевременным.

**Цель работы** – на основе материалов Архангельской сейсмической сети изучить структурные характеристики сейсмических полей от естественных и техногенных источников территории Архангельской области, оценить возможности сети по регистрации телесеismicких, региональных и локальных сейсмических событий.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- обобщить результаты мониторинга естественной и техногенной сейсмичности проводимого сейсмическими станциями Архангельской сети;
- адаптировать методику Института физики Земли РАН используемую для оценки чувствительности к регистрации подземных ядерных взрывов аналоговыми сейсмическими станциями для оценки чувствительности цифровых станций Архангельской сейсмической сети;
- оценить регистрационную представительность и магнитудную чувствительность сейсмических станций Архангельской сети;
- исследовать характерные особенности записей волновых форм промышленных взрывов по разным профилям «карьер-станция» и выработать на их основе методику идентификации взрывной сейсмичности на записях сейсмических станций;
- изучить возможности Архангельской сейсмической сети по регистрации техногенных событий на примере несанкционированных взрывов, запусков ракет и падения их первых ступеней. По сейсмическим записям определить их типовые амплитудно-частотные параметры.

**Практическая ценность и реализация работы.** Результаты исследований необходимы для проведения сейсмического районирования и оценки сейсмической опасности гражданских и промышленных объектов, в том числе и объектов значительного экологического риска, а также для оперативной идентификации сигналов при чрезвычайных ситуациях различной техногенной и естественной природы.

#### **Научная новизна работы.**

Диссертация представляет собой первый опыт решения перечисленных выше задач для Архангельской области.

Впервые проведены работы по количественной оценке магнитудной чувствительности сейсмических станций Архангельской сети на основе результатов мониторинга землетрясений за четыре года.

Была адаптирована и дополнена методика, применяемая в ИФЗ РАН, для расчета чувствительности регистрации подземных ядерных взрывов аналоговыми сейсмическими станциями.

На основе изучения характерных особенностей записей промышленных взрывов по разным профилям «карьер-станция», выработана и показана её

эффективность методики идентификации карьерных взрывов на записях сейсмических станций Архангельской сети.

Создан альбом характерных форм записей промышленных взрывов для разных профилей «карьер - сейсмическая станция».

Впервые исследованы сейсмические записи техногенных событий, происходивших на территории Архангельской области (несанкционированные взрывы, запуски ракет и падения их первых ступеней) и выявлены их характерные черты.

**Обоснованность результатов** – определяется использованием калиброванной аппаратуры, подтверждается статистическим анализом и повторяемостью результатов.

#### **Защищаемые положения.**

1. Сейсмическими станциями Архангельской сети накоплен достаточный объем данных по зарегистрированным землетрясениям на разных эпицентральных расстояниях для количественной оценки магнитудной чувствительности. Построенные карты и вычисленные таблицы характеризуют чувствительность каждой станции в зависимости от магнитуды землетрясений, их эпицентральных расстояний и азимутов.

2. Для слабоактивной в сейсмическом отношении Архангельской области наиболее яркими сейсмическими событиями до сих пор являются промышленные взрывы. На основе анализа волновых форм, созданных промышленными взрывами, разработана методика распознавания взрывной сейсмичности на записях сейсмических станций. Сформирован альбом характерных для Архангельской области записей волновых форм промышленных взрывов по разным профилям «карьер-станция».

3. Сейсмические станции Архангельской сети регистрируют техногенные события, происходящие на территории области. Получены основные амплитудно-частотные параметры волновых форм событий, таких как несанкционированные взрывы, запуски ракет и падений их первых ступеней.

**Апробация.** Работа над диссертацией была связана с выполнением исследований по плановым темам Института экологических проблем Севера УрО РАН: «Изучение полей напряжений и взаимодействия геосфер по геофизическим и сейсмическим данным на Европейском Севере», № Госрегистрации 01.200.1 15370 и «Изучение закономерностей проявления сейсмичности и геодинамических процессов в северных окраинных зонах Восточно-Европейской платформы», № Госрегистрации 0120.0604339.

Результаты работы доложены на Всероссийских и Международных конференциях в гг. Архангельске (2004, 2008 гг.), Перми (2005, 2007 гг.), Сыктывкаре (2005 г.), Екатеринбурге (2006 г.), Воронеже (2006 г.); на молодежных международных конференциях в г. Архангельске (2003, 2008 г.), Уральских молодежных научных школах по геофизике в гг. Пермь (2005, 2007 гг.) и Екатеринбург (2006, 2008 гг.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 23 статьи, в том числе 3 статьи в журналах из списка ВАК.

**Структура работы:** введение, 4 глав, 65 рисунков, 11 таблиц, заключение, 4 приложения. Объем работы 185 страницы, библиография включает 205 наименования.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, кандидату физико-математических наук Валентине Ивановне Французовой. Особую признательность автор адресует своему научному консультанту, члену-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук Алексею Всеволодовичу Николаеву за научные консультации. За творческое общение и дискуссии по отдельным вопросам работы автор признателен члену-корреспонденту РАН, доктору геол.-мин. наук, профессору Феликсу Николаевичу Юдахину, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. А.А. Маловичко, д.ф.-м.н. И.П. Габсатаровой, д.г.-м.н. Ю.Г. Кутинову, к.т.н. Г.Н. Антоновской, к.ф.-м.н. Е.В. Шаховой, сотрудникам Института экологических проблем Севера УрО РАН Н.В. Вагановой, Е.В. Смирновой, К.Б. Данилову, сотрудникам Геофизической службы РАН Я.В. Конечной, Е.В. Ивановой, А.С. Анисимову, сотрудникам ОАО «СОБР», ОАО «Карьер Покровское» и ОАО «Савинский ЦЗ». Особую благодарность автор выражает своей жене за понимание и поддержку.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В главе 1** дана общая характеристика геологического строения Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и, в особенности, Русской плиты, в пределах которой расположена Архангельская сейсмическая сеть, проанализирована историческая сейсмичность, возможность возникновения наведенной сейсмичности, а также подробно рассмотрен опыт изучения промышленных взрывов и возможные проявления природных и техногенных катастрофических событий.

В частности, отмечается, что геологическое строение исследуемой территории определяется её положением на северной окраине Русской плиты, в зоне сочленения плиты с Балтийским кристаллическим щитом, и здесь целесообразно говорить и принимать в расчет два глубинных источника региональных тектонических сил, латерально воздействующих на земную кору севера европейской России, т.к. в качестве основных активных элементов, внешних относительно этой территории, выступают Северо-Атлантический и Западно-Арктический сегменты срединно-океанической рифтовой системы (Макаров, 1996).

Анализ исторической сейсмичности ВЕП и, в частности, Русской плиты показал, что на территории платформы происходят и происходили в прошлом тектонические землетрясения. Большинство землетрясений имеют магнитуду <5,5 и гипоцентры их располагаются в верхней части коры на глубине 3-4 км (Андреев, 1956; Ананьин, 1968, 1987).

Применительно к территории Архангельской области, по характеру проявления сейсмичности территорию условно разделяют на три района (Юдахин, Французова, 2001): Беломорско-Двинской, Тимано-Печорский, Новоземельско-Пайхойский. Большая часть сейсмических событий

сконцентрирована в Беломорско-Двинском районе. Согласно историческим и инструментальным данным, в Архангельской области, включая архипелаг Новая Земля, за период с 1467 по 1997 г. проявилось более 125 землетрясений с магнитудой от 1,0 до 6,3 и глубинами очагов 0-25 км. Среди них самые значительные землетрясения – в районе Архангельска и в непосредственной близости от него в акваториях Двинской губы и горла Белого моря (*Юдахин, Французова, 2001*).

В связи с тем, что в последнее время антропогенная нагрузка на геологическую среду платформы постоянно увеличивается, то помимо естественной сейсмичности следует ожидать и возникновения наведенной сейсмичности (*Адушкин и др., 2007*).

В этом смысле Архангельская область является прекрасным полигоном для изучения наведенной сейсмичности с наличием большого количества крупных промышленных объектов: судоремонтных заводов, целлюлозно-бумажных и лесоперерабатывающих комбинатов; нефте- и газопроводов; функционированием космодрома «Плесецк»; ядерным полигоном на о.Новая Земля.

В главе проведен обзор по существующим региональным сейсмическим сетям. Показано, что для выполнения основных сейсмологических задач необходимо прежде решить задачи, которые являются первоочередными для новых сейсмических сетей. К таким задачам относятся оценка магнитудной чувствительности сейсмических станций и создание способа (методики) идентификации взрывной сейсмичности на записях станций. В главе рассматривается большой теоретический и практический опыт по оценке магнитудной чувствительности и создания способа идентификации на записях сейсмических станций промышленных взрывов и землетрясений.

В главе также показано, что Архангельская область является прекрасным полигоном для изучения техногенной событий различной природы и их последствий. Это связано, прежде всего, с наличием несанкционированных взрывов, таких как взрыв газа в жилом доме, падение ракеты «Булава», взрыв подводной лодки «Курск» в Баренцевом море, а также с усилением активности метеорологических факторов, в т.ч. катастрофических (ураганы), повышением штормовой активности северных морей – Баренцева и Белого (*Юдахин и др., 2002; Николаев и др., 2006; Французова и др., 2007*).

### **Выводы главы 1.**

1. Север Русской плиты, на примере Архангельской области, считается одним из типичных малосейсмичных платформенных районов, поэтому до недавнего времени изучение сейсмических полей от естественных и техногенных источников на территории области практически не проводилось.

2. Необходимость проведения на Севере Русской плиты сейсмологических исследований обусловлено:

- расположением на территории исследуемого региона промышленных и объектов высокого экологического риска: судоремонтные заводы, целлюлозно-бумажные и лесоперерабатывающие комбинаты, карьеры;

нефте- и газопроводы; космодром «Плесецк» и ядерным полигон на Новой Земле;

- тектоническими землетрясениями с магнитудой от 1,0 до 6,3 и глубинами очагов 0-25 км, которые происходили в прошлом на территории Русской плиты.

- возможностью возникновения в будущем на территории исследуемого региона наведенной сейсмичности из-за роста антропогенной нагрузки на геологическую среду. Наведенная сейсмичность будет проявляться не только в повышении вероятности возникновения значительных землетрясений, но и в ускорении криповых явлений, медленных движениях земной коры вдоль разломов и повышение уровня высокочастотной сейсмической эмиссии.

3. Опыт функционирования региональных сейсмических сетей на территории Восточно-Европейской платформы показал, что на начальном этапе функционирования сети необходимо решать такие первоочередные задачи, как оценка чувствительности сейсмических станций и выработка способа (критерия, методики) идентификации на записях станций взрывной сейсмичности.

4. На территории области функционируют несколько крупных промышленных карьеров, взрывы из которых могут случайно попасть в каталог Архангельской сейсмической сети и тем самым исказить представление о сейсмичности региона. Поэтому необходимо провести работу для выработки методики идентификации на записях сейсмических станций промышленных взрывов и землетрясений.

5. Опыт последнего десятилетия показывает, что формируется новый метод сейсмологии, ориентированный в основном на решение геоэкологических задач – сейсмологию чрезвычайных ситуаций и геомониторинг процессов, связанных с природными, природно-техногенными и техногенными катастрофами, что актуально и для Архангельской области. Поэтому необходимо положить начало большой работе по систематизации событий, характеризующих сейсмический отклик, зарегистрированных новых типов источников.

**Глава 2** посвящена аппаратно-методическим основам проведения стационарных наблюдений на территории исследуемого региона, анализу результатов мониторинга телесеизмических, региональных и локальных сейсмических событий и оценке магнитудной чувствительности сейсмических станций Архангельской сети.

С целью проведения на территории области мониторинга естественной и техногенной сейсмичности уже в 2004 году были введены в эксплуатацию первые станции Архангельской сейсмической сети (*Юдахин и др., 2004*). На сегодняшний день в состав сейсмической сети входят 7 станций, четыре из которых (Пермогорье (PRG), Тамица (TMC) и Климовская (KLM)) типа SDAS разработки НПП «Геотех+» ГС РАН (г. Обнинск), оснащенных тремя датчиками СМЗ-КВ и СМЗ-ОС (KLM) и 3 (Пермилово (PRM), Соловки (SLV) и



Лешуконское (LSK)) типа GSR-24 производства «GeoSIG Ltd» с датчиками CMG-40T-1 или CMG-3ESP, разработки фирмы «Guralp».

Обработка регистрируемых станциями сейсмических событий осуществляется в Информационно-обрабатывающем Центре (ИОЦ) в г.Архангельске с помощью пакета программ обработки WSG (Windows Seismic Grapher), разработки НПП «Геотех+».

Методика интерпретации записей сейсмических событий включает следующие моменты (*Инструкция о порядке производства наблюдений, 1981; Маловичко А.А. и др., 2007*):

- фильтрация записи набором фильтров для выделения полезного сигнала на фоне шума;
- оценка типа зарегистрированного события по внешнему виду записи (телесеismicкое, региональное, локальное, глубокофокусное, мелкое и т. д.);
- выделение первых вступлений объемных и поверхностных волн;
- замеры динамических характеристик записи (максимальных амплитуд, периодов, времени наступления максимальной фазы);
- вычисление эпицентрального расстояния и глубины очага, вычисление азимута на эпицентр события;
- вычисление спектров участков записей.

За рассматриваемый период было зарегистрировано около 8000 землетрясений на разных эпицентральных расстояниях, среди них одно местное тектоническое землетрясение, произошедшее на территории исследуемого региона 22 октября 2005 года. Оно вошло в каталог землетрясений, произошедших на территории РФ в 2005 году. Обработка записей с/с KLM, PRG, TMC и ARH позволила получить координаты гипоцентра:  $64.46^\circ$  с.ш.,  $40.95^\circ$  в.д.,  $h=1$  км,  $t_0=17ч46м46с$ ,  $Kp=6.7$ ,  $M=1.5$  (*Французова и др., 2006*).

Таким образом, в ИОЦ было накоплено достаточно материала по зарегистрированным сейсмическими станциями землетрясениям на разных эпицентральных расстояниях, чтобы приступить к решению задачи по оценке магнитудной чувствительности сейсмических станций. Для этого была адаптирована и применена методика ИФЗ РАН (*Аксенович Г.И. и др., 1988*).

Суть метода заключается в следующем. Пусть из  $n$  сигналов, относящихся к заданной эпицентральной зоне или интервалу расстояний  $\Delta + \delta\Delta$  и порожденных источниками с магнитудой  $m + \delta m$ , сейсмическая станция зарегистрировала  $n_1$  сигналов. Тогда отношение  $P = n_1 / n$  будет характеризовать как вероятность обнаружения сигналов для заданных интервалов расстояния и магнитуды. Кривые зависимости вероятности обнаружения сигналов от их энергии называются кривыми обнаружения. Для сейсмических источников энергетической характеристикой может служить магнитуда. Значение магнитуды  $m = m_{0.5}$ , при которой вероятность обнаружения сигнала в заданных условиях равна  $P = 0.5$ , называется магнитудной чувствительностью:  $P(m_{0.5}) = 0.5$ . Экспериментально определив значение  $m_{0.5}$  для различных эпицентральных расстояний, можно построить кривую чувствительности  $m_{0.5} = m_{0.5}(\Delta)$ . Кроме того, имеется возможность оценить магнитудную

чувствительность пункта регистрации для заданных значений азимута  $Az$ , т.е. рассчитать кривую чувствительности вида  $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta, Az)$ , где  $Az$  - азимут подхода сейсмических волн к регистрирующей станции. На основании кривых чувствительности и обнаружения можно оценить вероятность обнаружения сигнала для заданных  $m$ ,  $\Delta$  и  $Az$ .

В результате исследований, проведенных авторами (*Аксенович Г.И. и др., 1988*), для кривой обнаружения сейсмических сигналов была получена описывающая её функция, учитывающая основные факторы, определяющие вероятность обнаружения сейсмических сигналов на фоне помех:

$$P(m, \Delta) = \Phi \left[ \frac{m - m_{0,5}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2 + \sigma_8^2}} \right],$$

где  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-\frac{x^2}{2}) dx$  - функция Лапласа, а коэффициенты  $\sigma_i$

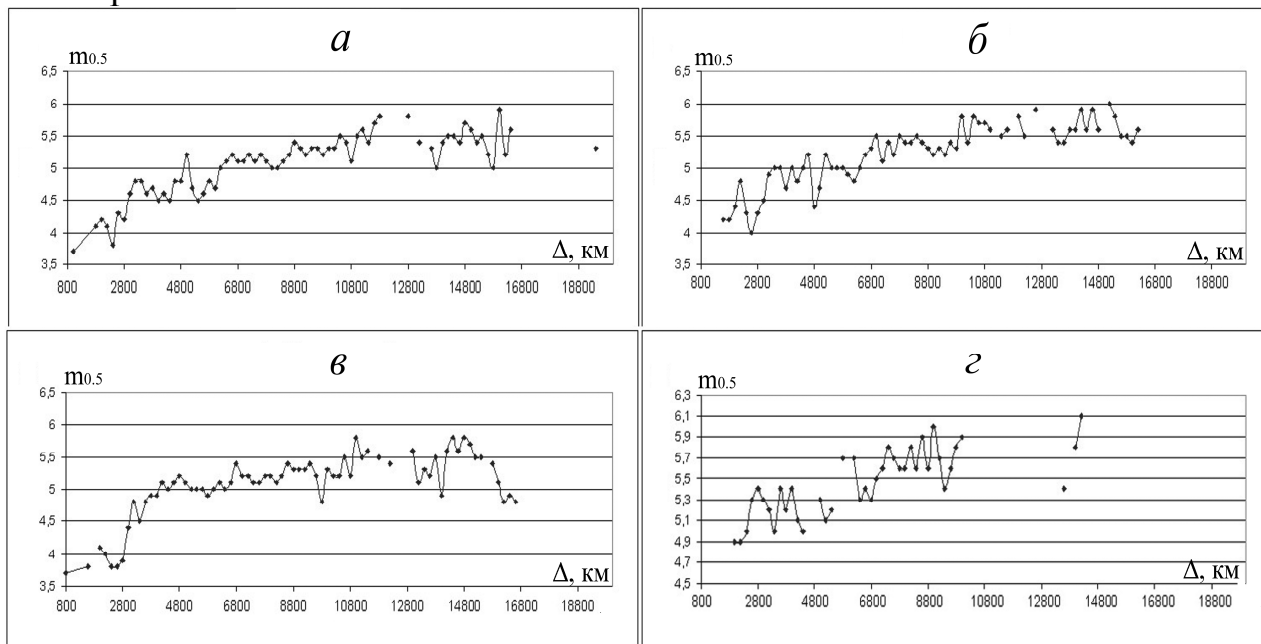
характеризуют изменчивость обнаружения сигнала в зависимости от специфических особенностей пункта регистрации и для каждой станции находятся экспериментально.

Рассмотренная выше методика была разработана авторами, прежде всего, для решения задач распознавания по записям аналоговых сейсмических станций подземных ядерных взрывов, производимых на ядерных полигонах. Для каждой станции строились кривые чувствительности и обнаружения только для определенных эпицентральных расстояний. Отчасти это объяснялось ещё и тем, что построение кривых для всех возможных эпицентральных расстояний и азимутов прихода сейсмических волн было очень трудоемким процессом.

В диссертационной работе, чтобы адаптировать методику для работы с цифровыми сейсмическими данными, мною была написана программа на языке Visual Basic, с помощью которой были получены значений функции  $m_{0,5}(\Delta)$  и  $m_{0,5}(\Delta, Az)$  для всех возможных значений  $\Delta$  и  $Az$ . А при расчете функции обнаружения, в качестве конечного результата, строилась таблица значений вероятности обнаружений события в зависимости от эпицентрального расстояния и магнитуды, что является нововведением для этой методики.

Расчет для каждой сейсмической станции (с/с) Архангельской сети кривой чувствительности производился с использованием каталога, зарегистрированных на станциях землетрясений. Он брался как минимум за годовой цикл наблюдений, во-первых, чтобы иметь достаточно представительный объем исходных данных, а, во-вторых, чтобы средний уровень помех за период наблюдений с равным весом отражал все сезоны года. При этом отсеивались землетрясения с глубиной более 70 км, чтобы избежать поправок на учет глубины. Для нахождения величины магнитуды  $m_{0,5}$  с шагом 200 км станционный каталог сравнивался с каталогом Геофизической службы РАН и строились кривые чувствительности (рис.1).

Согласно графикам (рис.1), значения магнитуд  $m_{0,5}$  для  $\Delta_1 = 800-3000$  км и  $\Delta_2 > 9000$  км равны, соответственно: на с/с KLM – 3.7-4.2, 5.0 – 5.9; на с/с PRG – 3.7-4.1, 4.9-5.8; с/с TMC 4.2-4.8, 5.4-6.0. Для значений  $\Delta = 3000-9000$  км  $m_{0,5}$  определяется, соответственно, величинами: для с/с KLM  $m_{0,5} = 4.3 – 5.3$ ; с/с PRG – 4.6 – 5.4; с/с TMC – 4.7 – 5.5. Для с/с ARH результат является недостоверным, из-за малого количества зарегистрированных станцией землетрясений.



**Рисунок 1** – Кривые магнитудной чувствительности сейсмических станций: а –KLM; б – TMC; в – PRG, г – ARH (Морозов А.Н., Французова В.И., 2009)

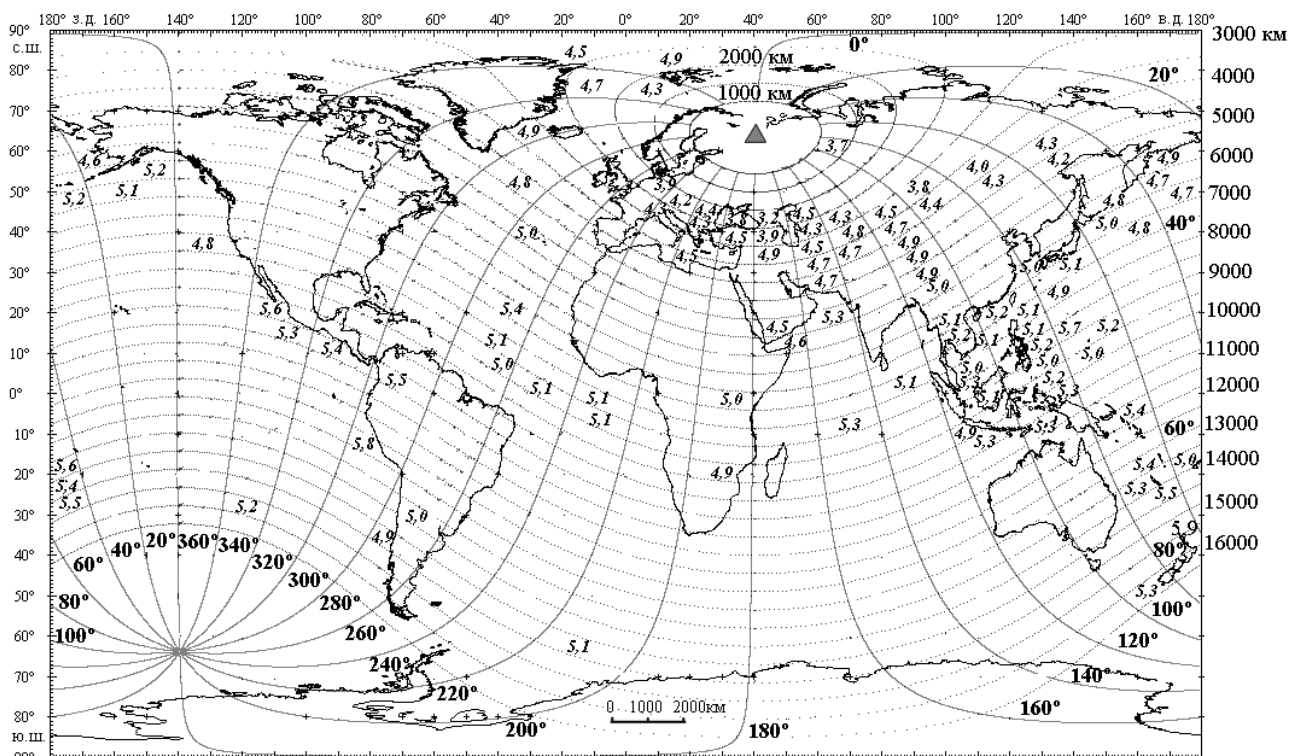
Пример построения распределения чувствительности согласно функции  $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta, Az)$  для с/с KLM с шагом  $20^\circ$  представлен на рисунке 2. Анализ карт для каждой станции помогает получить представление о возможностях регистрации конкретной станцией землетрясений из разных эпицентральных зон.

Следующим шагом для оценки регистрационной представительности сейсмических станций было нахождение для каждой станции своей функции обнаружения. Оценка коэффициентов  $\sigma_i$  позволила получить для каждой станции следующий вид функции обнаружения: с/с «Климовская» -

$$P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0,5}}{0.368}\right); \text{ с/с «Пермогорье» - } P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0,5}}{0.371}\right); \text{ с/с «Архангельск» -}$$

$$P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0,5}}{0.372}\right); \text{ с/с «Тамица» - } P(m, \Delta) = \Phi\left(\frac{m - m_{0,5}}{0.407}\right).$$

По полученным зависимостям были построены для каждой станции таблицы вероятности регистрации события в зависимости от эпицентрального расстояния и магнитуды события.



**Рисунок 2** - Карта распределения чувствительности с/с КЛМ согласно функции  $m_{0,5} = m_{0,5}(\Delta, Az)$  в зависимости от эпицентрального расстояния и азимута подхода сейсмических волн (Морозов А.Н., Французова В.И., 2009)

## Выводы главы 2.

1. На территории Архангельской области для решения различных сейсмологических задач и, в частности, для изучения сейсмических полей от естественных и техногенных источников создана сейсмическая сеть, состоящая из:

- сейсмических станций SDAS (производства НПП «Геотех+») и GSR-24 (производства «GeoSIG Ltd») с короткопериодными и широкополочными датчиками. Технические и эксплуатационные характеристики аппаратуры и сейсмических датчиков удовлетворяют необходимым требованиям для работы на территории исследуемого региона. Установка регистрирующего оборудования в отдельных пунктах предварялась рекогносцировочными работами по анализу геологических особенностей и уровня сейсмического шума в заранее намеченных местах.

- Информационно-обрабатывающего центра в г. Архангельске, куда поступает информация со всех сейсмических станций. Анализ сейсмических записей осуществляется с помощью встроенных в программный комплекс WSG (разработки ГС РАН) математических функций по определению кинематических и динамических характеристик сейсмических событий.

2. За период с 2004 по 2008 г.г. в ИОЦ было накоплен достаточный объем данных по зарегистрированным сейсмическими станциями телесеismicких, региональных и локальных сейсмическим событиям, что позволило приступить к для решению задачи по оценке магнитудной чувствительности сейсмических станций. Для этого была адаптирована и применена методика ИФЗ РАН,

используемая для оценки чувствительности к регистрации подземных ядерных взрывов аналоговыми сейсмическими станциями.

3. Впервые получены результаты по оценке чувствительности станций в зависимости, как от эпицентрального расстояния, так и от азимута прихода сейсмических волн. Для каждой станции была построена таблица значений вероятности регистрации сейсмического события в зависимости от его эпицентрального расстояния и магнитуды.

**Глава 3** посвящена решению задачи идентификации промышленных взрывов и землетрясений на записях сейсмических станций.

Как было отмечено в главе 1, основной вклад в техногенную сейсмичность Архангельской области вносят промышленные карьеры. На территории области функционирует значительное число карьеров: «Покровское», «СОБР», «Савинский», «Золотуха», «Архангельский», «Северобазальт» (п.Мяндуха и д.Орлецы). В карьерах добывают, в основном, бокситы, гипс, карбонатные породы для цементной и целлюлозно-бумажной промышленности, глину для цементной промышленности и общераспространенные полезные ископаемые. При этом основной объем взрывных работ производится в трёх карьерах: «Покровское», «Савинский» и «СОБР» (рис.1).

Для решения задачи идентификации промышленных взрывов и землетрясений на записях сейсмических станций были изучены волновые формы 143 записей взрывов из карьеров «Покровское» ( $N_1=54$ ), «СОБР» ( $N_2=53$ ) и «Савинский» ( $N_3=36$ ), зарегистрированных с/с ТМС, KLM, PRM.

Исследования по поиску характерных для промышленных взрывов особенностей записей волновых форм были начаты для профиля «карьер Покровское – с/с ТМС». Это обусловлено благоприятными геологическими особенностями трассы «карьер-станция» и малым расстоянием между карьером и сейсмической станцией.

На записях с/с ТМС промышленных взрывов из карьера «Покровское» четко выделяются вступления объемных (P, S) и поверхностных волн. Через  $\approx 44$  сек на записях отмечается вступление акустической волны, скорость распространения которой близка к 330 м/с. Можно предположить, что возникновение и значительная интенсивность этой волны связаны с особенностями зоны, в которой производился взрыв. Зона представляет собой котлован, аналогичный довольно глубокой «кальдере» с почти отвесными стенками, одна из которых отгораживает зону от Онежского залива, что возможно увеличивает интенсивность волны

Частотный анализ объемных волн показал, что практически с самого первого вступления в записи присутствует относительно низкочастотная составляющая от 0,6 до 2 Гц, что, как отмечается в (Адушкин и др., 2003), характерно для взрывных событий и проявляется только в определенных горно-геологических условиях, и, возможно, при наличии достаточно высоких тектонических напряжений. Также, отмечается факт наличия в P волне

максимальных амплитуд в полосе от 8 до 16Гц, что может рассматриваться как свойственное взрывам (Габсатарова, Французова, 2004).

На следующем этапе исследований мною была предпринята попытка опробовать сформулированные выше характерные особенности записей взрывов при анализе взрывов, зарегистрированных на других профилях: «СОБР – с/с ТМС», «СОБР – с/с КЛМ», «Савинский – с/с КЛМ», «Покровское – с/с КЛМ», «Савинский – с/с ТМС», (рис.3). Анализ показал схожесть характерных особенностей записи, что позволило нам выработать основные положения методики идентификации.

Таким образом, методика распознавания взрывов требует выполнения следующей последовательности действий:

1. проверить местоположение эпицентра и время в очаге. Если эпицентр находится в зоне известных карьеров и сейсмическое событие зафиксировано в дневное время, то можно уже в первом приближении предположить, что это, возможно, взрыв;

2. изучить структуру волнового поля записи, которая должна содержать группу объемных P, S и поверхностных R волн;

3. проанализировать огибающую записи, характерный вид которой содержится в базе данных огибающих взрывов по разным профилям для разных карьеров. В частности, определить соотношение максимальных амплитуд в группах P и S или P и R волн;

4. рассчитать спектры участков записей волн P и S, содержащих максимальные амплитуды, и затем проанализировать соотношение максимумов спектров этих волн, по значению которых определить тип события;

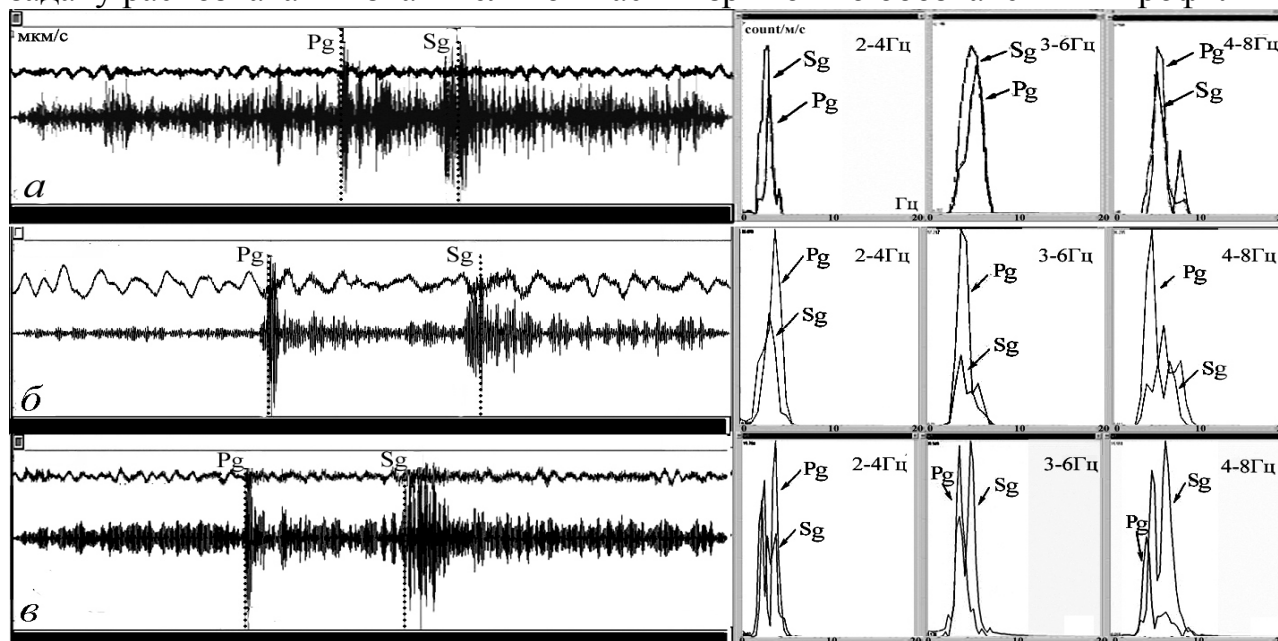
5. определить наличие (отсутствие) акустической волны.

Проверка выработанной методики идентификации на записях местного землетрясения подтвердила работоспособность методики, что позволяет в будущем более уверенно определять природу зарегистрированных местных сейсмических событий.

Как показало исследование особенностей записей взрывов, достоверная их идентификация в некоторых случаях не всегда возможна, прежде всего, из-за трудностей выделения вступления волн Pg, Sg возникающих по разным причинам. Для решения этой проблемы был опробован подход, который заключается в совместном (комплексном) использовании выработанной выше методики с методикой разработанной в Кольском Региональном Сейсмологическом Центре (КРСЦ РАН), основанной на анализе соотношений средних амплитуд волн P и S.

В частности, такой комплексный подход позволяет по методике КРСЦ уточнить (сузить) окно фильтрации, в котором срабатывает уже достаточно надежно методика сопоставления максимумов спектров волн P/S. При этом было показано, что использование по записям сейсмических станций Архангельской сети отдельно методики КРСЦ РАН для распознавания взрывной сейсмичности неэффективно.

Результаты опробования подтвердили эффективность совместного их применения, поскольку в этом случае представляется возможным решить задачу распознавания значительной части взрывов по обозначенным профилям.



**Рисунок 3** – Примеры волновых форм (каналов Z) записей взрывов из карьеров и сравнение спектральных характеристик волн Pg, Sg в различных частотных окнах: а – карьер «СОБР»-с/с ТМС; б - карьер «СОБР»-с/с KLM; в - карьер «Савинский», -с/с KLM (Французова В.И. Морозов А.Н., 2007)

### Выводы главы 3.

1. На основе анализа характерных особенностей записей волновых форм промышленных взрывов, по разным профилям «карьер-станция», впервые решена задача для изучаемого региона по выработке методики идентификации взрывной сейсмичности на записях сейсмических станций Архангельской сети.

2. Проверка выработанной методики на записях местного землетрясения показала её работоспособность.

3. Для повышения качества идентификации взрывов и землетрясений на записях сейсмических станций выработан комплексный подход к анализу записей сейсмических событий с использованием, дополнительно, методики идентификации разработанной в КРСЦ РАН.

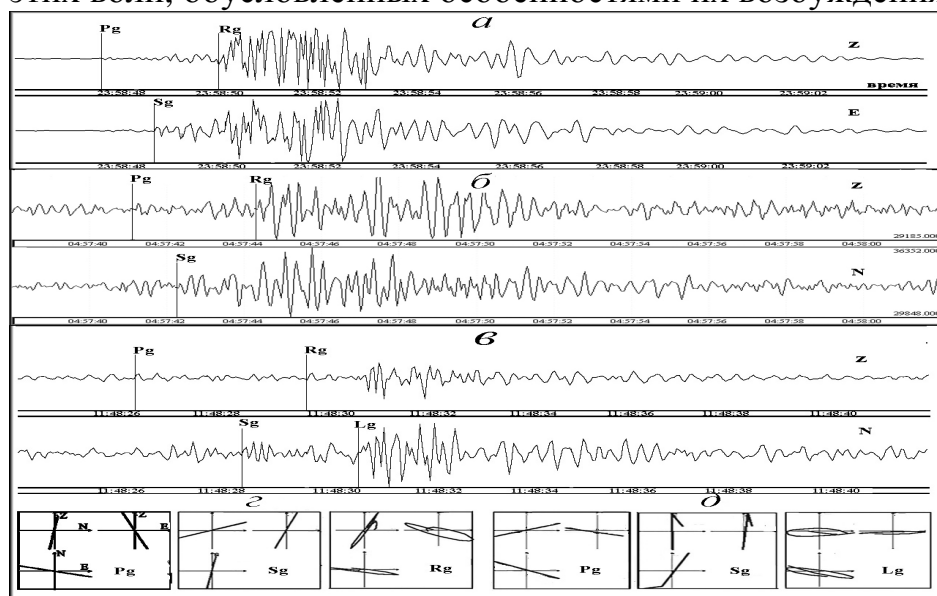
**В главе 4** рассмотрены возможности Архангельской сейсмической сети по регистрации техногенных событий на примере двух взрывов газа, запусков ракет и падений первых ступеней.

Для малосейсмичной Архангельской области, с высоким уровнем техногенной нагрузки на среду и расположением большого количества гражданских и военных объектов особой важности, проведение сейсмического мониторинга в значительной степени ориентировано на решение задач «сейсмологии чрезвычайных ситуаций» (Николаев и др., 2008). Ниже будут рассмотрены первые результаты по изучению сейсмического отклика на такие техногенные события как несанкционированные взрывы, запуски ракет и падений их первых ступеней.

Сейсмологическая хроника техногенных катастроф в г. Архангельске начата 15 марта 2004г в 23ч58м16с (время по Гринвичу), а затем и 10 февраля 2009 года в 04ч56м42с (время по Гринвичу), когда с/с ARH зарегистрировала взрывы в домах, расположенные, соответственно, на проспекте Советских Космонавтов 120 и улице Гайдара, 13, повлекших за собой разрушение подъездов жилых домов и многочисленные человеческие жертвы. Причина взрывов – утечка бытового газа.

Почти ровно через 2 года после первого взрыва бытового газа в доме, 16 марта 2006 г в 11ч48м16с (время по Гринвичу) с/с ARH был зарегистрирован еще один взрыв, произошедший на Соломбальском доке завода «Красная кузница». Согласно сообщениям, поступивших из СМИ, взрыв произошел во время сварочных работ топливных баков на плашкоуте «Вайново» и также сопровождался человеческими жертвами (рис.4а-д).

Техногенные взрывы произошли в ближней к сейсмической станции зоне ( $\Delta_1 \approx 1$  км,  $\Delta_2 \approx 2$  км,  $\Delta_3 \approx 2-3$  км), при этом источники у них отличаются. В первых двух случаях взрывы газа произошли, соответственно, на площадке девятиэтажного дома (рис.4а) и пятиэтажного дома (рис.4б), в третьем – это взрыв баков на судне, стоящем на рейде в излучине реки Северная Двина (рис.4в). Различны пути прохождения сейсмических волн: при первых двух взрывах сейсмические волны пробегают более короткую трассу по участку со сравнительно рыхлыми отложениями (замочено-мерзлыми породами); при третьем – волны распространяются по профилю, включающему дно реки Северная Двина. Сравнение сейсмических волновых полей этих взрывов на вертикальном (Z) и одном из горизонтальных каналов показывает, что они имеют очень схожую структуру: содержат группы волн Pg, Sg и поверхностной волны Релея Rg, но различаются длительностью и частотно-амплитудным составом этих волн, обусловленных особенностями их возбуждения.



**Рисунок 4** - Техногенные взрывы в г. Архангельске, зарегистрированные на с/с ARH: а-в – соответственно волновые формы записи волн Pg, Sg, Rg от техногенных взрывов в домах на ул. Сов.Космонавтов, ул. Гайдара и на плашкоуте «Вайново»; г, д – соответственно диаграмма движения частиц волн Pg, Sg, Lg от техногенных взрывов на ул. Сов.Космонавтов и на плашкоуте «Вайново» (Юдахин Ф.Н. и др, 2009)

Записи объемных волн Pg и Sg представляют интерференционную картину с несколькими экстремумами, регистрируемыми в виде отдельных импульсов. Преобладающие частоты волн Pg для первых двух взрывов, соответственно, 4.5-7.5 Гц и 4.8-7.7 Гц, для третьего – 1.5-3Гц, 3.5-5Гц. Частотный состав волны Sg



меняется незначительно: для первых двух взрывов диапазон максимума спектральной плотности определяется частотами 3.5-6.5 Гц и 2.5-4.2 Гц, для третьего равен 4.5-6.5 Гц (табл. 1). Энергетический класс ( $K_p$ ) взрывов, рассчитанный по методу Т.Г. Раутиан, составил:  $K_{p1} = 4.5$  ( $M1 = 0.63$ ) для первого,  $K_{p2} = 4.0$  для второго и  $K_{p3} = 6.8$  ( $M3 = 1.6$ ) для третьего взрыва.

Четвертое техногенное событие - падение ступени ракеты «Булава», запуск которой производился с подводной лодки 25 октября 2006 г в 13ч28м34с (время по Гринвичу) и зарегистрированное с/с ТМС.

Структура записи события аналогична предыдущим, на сейсмограммах также прослеживаются все три типа волн: объемные ( $P_g$ ,  $S_g$ ) и на хвостовой части записи – поверхностные. Частотные характеристики волновых полей  $P_g$ ,  $S_g$ ,  $L_g$  узкополосны с преобладающими частотами в диапазоне 8-10 Гц для  $P_g$  и более широкополосные для  $S_g$  и  $R_g$  – 7-11 Гц (табл.1).

Результаты обработки данных от падения ступени ракеты по данным Архангельской службы сейсмического мониторинга на с/с ТМС –  $t_0=13ч28м34с$ ,  $\varphi_1=63.70^\circ$  с. ш.,  $\lambda_1=36.64^\circ$  в. д.,  $K_p=8.7$ . Предположительно, акустическая волна регистрируется через 4 минут 07секунд после начала вступления волны  $P_g$ .

Следует отметить, что регистрация этих волн на записях сейсмических событий однозначно определяет их принадлежность к техногенным воздействиям, и по этой причине является безусловным признаком опознания типа сейсмического воздействия, как техногенного.

Следующая техногенное событие – падение ступени космического объекта, запущенного с космодрома «Плесецк» и зарегистрированного с/с LSK. Локализация места падения проведена по записям одной станции LSK.

В целом, структура волнового поля при падении ступени космического объекта аналогична уже рассмотренным случаям, т.е. содержит все перечисленные выше группы сейсмических волн ( $P_g, S_g, R_g$ ). Координаты эпицентра сейсмического события попадают в район полигона, используемого для падений первых ступеней ракет. Амплитудно-частотные характеристики события представлены в таблице 1.

Помимо падений ступеней Архангельской сейсмической сетью регистрируются и сами запуски ракет с космодрома «Плесецк». Сейсмический отклик от запусков ракет с космодрома представлен на записях сейсмической станции PRM в виде акустических сигналов.

Было показано, что акустические волны, генерируемые при запусках разнотипными ракетными комплексами с космодрома «Плесецк», состоят из начальной части записи каналовой волны - импульса давления в фазе сжатия акустического сигнала и вторичной - отраженной от верхней границы инверсионного слоя волны, появление и интенсивность которых тесно связано с расположением слоя температурной инверсии в пределах приземного слоя или в атмосфере, приподнятом на некоторую высоту, а также с мощностью инверсионного слоя. Кроме того, показано изменение волновой картины на записях акустической волны, возникающей при запусках космических объектов ракетами разных типов.

Частотный анализ показал (табл.1), что акустическим волнам на вертикальных каналах характерны повторяющиеся для каждого запуска частоты 1.2, 1.5, 3.9 Гц, на горизонтальных каналах преобладающие частоты сильно варьируются от запуска к запуску, при этом можно выделить частоты 3.5, 14.8, 15.9 Гц.

Таблица 1 – Диапазон преобладающих частот сейсмических волн техногенных катастроф на территории Архангельской области

Тип техногенного воздействия	Кр/М	Δ, км	Интервалы преобладающих частот сейсмических волн, Гц						
			Pg	Sg		Rg, Lg			Акуст. волна
			Z	NS	EW	Z	NS	EW	
Взрыв дома на ул. Сов. Космонавтов	4.5/0.6 3	1.0	4.5-7.5	3.5-6.5		0.5-3.5	4.5-5.5		
Взрыв дома на ул.Гайдара	4/-	2	4.8-7.7	2.5-4.2	2.2-3.8	2.2-3.1	1.9-4.6	2.2-3.3	
Взрыв на плашкоуте «Вайново»	6.8/1.6	2-3	1.5-3 3.5-5	4.5-6.5			2-7		
Падение ступени ракеты «Булава»	8.7/2.6	80	8-10	8-11			7-11	-	3.0-4.0, осн. част. 3.5
Падение ступени ракеты после запуска с космодрома «Плесецк»		46	1-6 7-12 16-19	3-7 8.5-10.5	5-7	1-2.5 4-7 9-11 16-19	4-6	3-5 13-15	
Запуск ракеты 23.05.2008 «Рокот»		90				1.5 3.9	13.7 20.7	11.3 14.0	

Таким образом, приведенные примеры показывают, что уже первые годы работы Архангельской сети сейсмических станций обозначают новый метод сейсмологии, ориентированный в основном на решение геоэкологических задач – «сейсмологию чрезвычайных ситуаций» и геомониторинг процессов, связанных с природными, природно-техногенными и техногенными катастрофами. Регистрация и последующая обработка подобных техногенных событий, с получением данных о времени, месте и энергии источника, может быть полезна, как показал опыт, для региональных отделений МЧС, ФСБ и МВД.

#### **Выводы главы 4.**

1. Выявлены основные характерные черты и амплитудно-частотные параметры сейсмических записей техногенных событий, происходивших на территории Архангельской области на примере несанкционированных взрывов, падений ракет и их первых ступеней.

2. Положено начало пополнению банка данных отличительных особенностей техногенных событий для осуществления возможности в будущем мониторинга подобных процессов.

3. Выявлен факт регистрации на записях сейсмической станции «Пермилово» акустических волн, индуцированных запусками ракетных комплексов с космодрома «Плесецк», состоящие из прямых и отраженных волн. Показано изменение волновой картины на записях акустических волн, возникающей при запусках космических объектов разнотипными ракетными комплексами.

### **Заключение.**

Сейсмические наблюдения в Архангельской области были начаты в 2003 году и, в настоящее время сеть состоит из 7 станций. Выбор конфигурации сети преследовал цель контроля сейсмичности на территории области и примыкающих регионов. Дальнейшее развитие предполагает расширение сети, более полный охват контролируемых территорий Баренцево моря и о.Новая Земля.

За время наблюдений зарегистрировано 1 местное землетрясение, более 140 карьерных взрывов, 7 запусков ракет с космодрома «Плесецк» и падения первых ступеней ракет. Эти данные позволили получить первые данные о кинематических и динамических особенностей записи близких источников – карьерные взрывы и удаленных землетрясений, произошедших в основных сейсмоактивных районах Земного шара. Проведенное мною в рамках диссертационной работы исследование естественной и техногенной сейсмичности позволило получить следующие результаты:

1. Выполнена количественная оценка магнитудной чувствительности сейсмических станций Архангельской сети на основе результатов мониторинга землетрясений за четыре года. Для каждой станции построены кривые чувствительности и обнаружения. На основании кривых чувствительности и обнаружения оценены вероятности обнаружения сигнала для заданных магнитуды, эпицентрального расстояния и азимута прихода сейсмических волн.

2. Проанализирована возможность сейсмической сети по регистрации телесеизмических, региональных и локальных (местных) сейсмических событий в зависимости от магнитуды. Показано, что сейсмические станции хорошо регистрируют сейсмические события на разных эпицентральных расстояниях.

3. Выработана методика идентификации взрывной сейсмичности на записях сейсмических станций. Проверка методики как по записям промышленных взрывов по разным профилям «карьер-станция», так и по записям местных землетрясений показала её работоспособность. Для повышения качества идентификации рассмотрена возможность использовать в комплексе методику идентификации, разработанную в КРНЦ РАН.

4. Для Архангельской области создан альбом характерных форм записей промышленных взрывов для разных профилей «карьер-станция». Проведена характеристика промышленных карьеров региона.

5. Выявлены характерные черты и амплитудно-частотные параметры сейсмических записей техногенных катастроф, происходивших на территории

Архангельской области (несанкционированные взрывы, запуски ракет и падение первых ступеней).

Дальнейшее развитие сети станций требует не только увеличение их числа, но и повышение эффективности решения задач сейсмического мониторинга как сильных событий, происходящих на Земном шаре, так и природных и техногенных событий, связанных с чрезвычайными ситуациями. Эти требования диктуют необходимость установки на станциях приборов регистрации других геофизических полей – магнитного, электрического, электромагнитного, а также для регистрации метеорологических параметров атмосферы.

Начатое исследование сейсмического волнового поля должно быть продолжено с более детальным изучением сейсмичности экзогенного и эндогенного происхождения в широком диапазоне частот.

### **Основные положения диссертации отражены в работах:**

#### **Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных изданиях:**

1. *Морозов А.Н.* Метод идентификации взрывной сейсмичности на территории Архангельской области // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2008. №1 Выпуск № 11 С. 177-184.

2. *Морозов А.Н., Французова В.И.* Оценка эффективности регистрации сейсмических событий станциями Архангельской сейсмической сети // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные и точные науки, 2009, № 1. С. 35-39.

3. Юдахин Ф.Н., Французова В.И., Николаев А.В., *Морозов А.Н.* Сейсмичность Архангельской области: контроль природных и техногенных катастроф и процессов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2009, № 4. С. 421-428.

#### **В сборниках и материалах конференций 20 статей, среди них:**

1. Габсатарова И.П., Французова В.И., Юдахин Ф.Н., *Морозов А.Н.* Сейсмологическая интерпретация техногенного взрыва в г. Архангельске // Матер. Всероссийской конф. с межд. участием «Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде Северных регионов». Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. Т. I. С. 148-153.

2. *Морозов А.Н., Французова В.И.* Некоторые особенности промышленных взрывов из карьера “Покровский” // Матер. Шестой Уральской молодежной школы по Геофизике. Пермь, 2005. С.141-145.

3. Николаев А.В., Французова В.И., Асминг В. Э., *Морозов А.Н.* О совместной идентификации карьерных взрывов на записях станций Архангельской сети // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере: Методы, средства и результаты изучения: Матер. двенадцатой межд. конф. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2006. Т.2, С.12-17.

4. Французова В. И., *Морозов А. Н.* Опыт регистрации и идентификации промышленных взрывов на сейсмических станциях Архангельской сети // “Современные методы обработки интерпретации сейсмологических данных”: Материалы Второй межд. сейсмол. школы Обнинск : ГС РАН, 2007, С. 189-193.

5. Французова В. И., *Морозов А. Н.* Оценка эффективности регистрации сейсмических событий Архангельскими станциями //“Северные территории России: проблемы, перспективы развития.Матер. Всероссийск. Конф. С межд. участием, Архангельск, 23-26 июня 2008г. С.924-928.

6. Французова В. И., Тихомиров С. Н., Попов Д. В., *Морозов А.Н.* Сейсмический контроль техногенных катастроф // “Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов”: Материалы межд. Конференции, Казань, 2007. С. 262-266.