

На правах рукописи

Степнов Андрей Александрович

Комплексная автоматизированная система мониторинга для анализа современной
сейсмичности Северного Сахалина

(25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Южно-Сахалинск

2015 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН).

Научный руководитель – Коновалов Алексей Валерьевич, кандидат физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

Ивашенко Алексей Илларионович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), г. Москва, старший научный сотрудник;

Быков Виктор Геннадьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИТиГ ДВО РАН), г. Хабаровск, заместитель директора по научным вопросам.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН).

Защита диссертации состоится «08» декабря 2015 г. на заседании диссертационного совета Д002.050.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН) по адресу: 119334 г. Москва, Ленинский проспект, д.38, корпус 1, в 11 ч. 00 мин.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на официальном web-сайте ИДГ РАН <http://idg.chph.ras.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета – Рыбаков Владимир Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Совершенствование методологии обработки сейсмологических данных основано, в первую очередь, на многолетней практике использования цифровой регистрирующей аппаратуры, накопления банка данных и интенсивного роста компьютерных технологий. Опыт, приобретенный ведущими российскими и международными сейсмологическими коллективами и аналитическими центрами, позволяет адаптировать наиболее перспективные методы обработки сейсмологических данных к существующим и развивающимся системам инструментальных наблюдений на территории Сахалинской области.

Остров Сахалин – регион России, в котором отмечается высокий уровень сейсмической активности. Первые документально подтверждённые данные о сильных землетрясениях датируются 1905 годом. Вместе с тем, районы промышленной разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и подавляющая часть сопутствующей инфраструктуры расположены в зоне активных разломов разного ранга и возраста, выявленных по результатам многочисленных геолого-геофизических исследований (Булгаков Р.Ф. [и др.]. Активные разломы Сахалина // Геотектоника. 2002. № 2. С.66-86.; Katsumata K. [et al.]. The 27 May 1995 MS 7.6 Northern Sakhalin earthquake: an earthquake on an uncertain plate boundary // Bull. Seis. Soc. Am. 2004. Т. 94, № 1. С. 117-130.; Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.; Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 года ($M_w=5.8$) на северо-западе о. Сахалин // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 37-49). Эти зоны характеризуются высоким сейсмическим потенциалом. Есть опасения, что продолжительное истощение месторождений нефти и газа может спровоцировать разрядку ранее накопленных естественных напряжений в близлежащих зонах разломов и вызвать таким образом триггерные землетрясения.

Энергия триггерных событий не может быть выше энергии землетрясений естественного происхождения. Вероятно, пример самого сильного проявления триггерной сейсмичности – серия сильных землетрясений ($M \sim 7.0$) на газовом месторождении (Газли) в Средней Азии (Акрамходжаев А.М., Ситдилов Б.Б., Бегметов Э.Ю. О возбужденном характере Газлийских землетрясений в Узбекистане // Узбекский геол. журнал. 1984. № 4. С. 17-19). Возможная связь данных сейсмических событий с производственной деятельностью на месторождениях до сих пор обсуждается (Bossu R. [et al.]. Complexity of intracontinental seismic faultings: The Gazli, Uzbekistan, sequence // Bull. Seis. Soc. Am. 1996. Т. 86. С. 959-971). Поэтому триггерная сейсмичность представляет серьезную опасность при промышленном освоении месторождений нефти и газа на о. Сахалин.

Сопоставление наблюдаемых закономерностей сейсмического процесса и последних теоретических и лабораторных исследований кинетических процессов в механике разрушения (Ben-Zion Y. Collective behavior of earthquakes and faults: Continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes // Reviews of Geophysics. 2008. Т. 46, №. 4) позволило обосновать поведение некоторых фундаментальных параметров, определяющих сейсмический режим зоны разлома. Совокупность временных и магнитудно-частотных эмпирических характеристик сейсмичности служит определяющим фактором для поиска корреляции между наблюдаемыми закономерностями и результатами компьютерного моделирования коллективного поведения землетрясений и разломов. Оценка характера сейсмичности с учётом фактора человеческой деятельности позволит определить наиболее полную картину сейсмического режима региона.

На современном этапе развития инструментальной сейсмологии решение этих задач основывается, прежде всего, на использовании материалов наблюдений, полученных с помощью локальных, региональных и глобальных сетей цифровых сейсмических станций, а также на применении все более совершенных компьютерных технологий и методов обработки цифровых данных.

Цель и задачи работы. Создание системы сейсмического мониторинга для выявления закономерностей пространственно-временного распределения очагов землетрясений и разломов на севере о. Сахалин в условиях интенсивной разработки нефтегазовых месторождений. Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

- разработка комплексной автоматизированной системы мониторинга, с учётом локальных географических и геологических особенностей региона, направленной на обеспечение регистрации, архивации и достаточной функциональности для анализа сейсмологических данных на уровне ведущих международных аналитических центров;
- создание кондиционного каталога землетрясений района промышленной разработки месторождений нефти и газа;
- изучение пространственного распределения сейсмичности на севере о. Сахалин с привязкой к активным геоструктурам региона;
- оценка параметров фонового режима естественной сейсмичности в районе нефтегазовых месторождений шельфовой области до начала активной фазы эксплуатации.

Методология и методы исследования. Использовался апробированный набор методов для анализа сейсмологических данных, реализованный на базе ПО с открытым исходным кодом (SEISAN, SEISNET, RTQUAKE, EARTHWORM): определение координат и глубины гипоцентра,

оценка магнитуды, оценка погрешностей в расчётах. Применялись математические методы статистической обработки рядов наблюдений.

Архитектура комплексной автоматизированной системы была разработана на основе требований отечественных и международных стандартов в области реализации информационных систем: ГОСТ Р 53622-2009, ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288. Отдельные программы, реализующие функции расширенной автоматизации, включая методы статистического анализа, были разработаны автором с использованием языков программирования: С, BASH.

Применен комплексный подход для изучения сейсмического режима в районе производственной деятельности на месторождениях нефти и газа. В частности, исследованы механизмы очагов, параметры гипоцентров, характер сейсмичности. Привлекались независимые данные о геолого-тектонической обстановке исследуемого района, характере деформирования островного региона по данным спутниковой геодезии, а также характере техногенного воздействия. Выполнялось сопоставление постсейсмического процесса в различных сейсмогенных зонах, в том числе в районе техногенного воздействия.

Основные защищаемые положения:

1. Реализована комплексная автоматизированная система мониторинга за естественной и техногенной сейсмичностью с полной автоматизацией процедур сбора, передачи, хранения и рутинной обработки данных. В автоматическом режиме система без пропусков детектирует и определяет параметры очага землетрясения по четырем и более станциям для $M_L \geq 3$ и идентифицирует событие на цифровом канале для $M_L \geq 1$.

2. Обоснована точность определений параметров гипоцентров землетрясений ($M_L \geq 0$): погрешность в определениях широты ($\Delta\phi$), долготы ($\Delta\lambda$) эпицентра и глубины очага (ΔH) для 80% зарегистрированных событий не превышает 10 км. Обоснована представительность каталога землетрясений севера о. Сахалин с 50.0 по 55.0 гр. с.ш., с 140.5 по 145.0 гр. в.д. по магнитуде $M_L \geq 2$.

3. Установлено, что в очаговых зонах сильных землетрясений на севере о. Сахалин наблюдаются повторные землетрясения спустя несколько месяцев, а далее спустя несколько лет после главного события. Магнитуда указанных событий сопоставима либо превосходит магнитуду сильнейшего афтершока первых суток.

4. Получена модель пространственного распределения современной коровой сейсмичности на севере о. Сахалин, по которой идентифицирован новый активный разлом, находящийся в непосредственной близости от разрабатываемых шельфовых месторождений нефти и газа, по разлому возможны подвижки триггерного характера.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые для условий Северного Сахалина получен опыт разработки и внедрения комплексной автоматизированной системы мониторинга за естественной и наведенной сейсмичностью на базе компонент с открытым исходным кодом. Впервые для условий Сахалина рассчитан набор параметров локальной сейсмической сети необходимый для автоматического определения координат гипоцентра и магнитуды землетрясений, возникающих в зоне мониторинга. Разработана уникальная архитектура информационной системы, объединяющая набор аппаратных и программных средств и практически реализованная в рамках детальных сейсмологических наблюдений на севере о. Сахалин. Разработан набор дополнительных программ, реализующих анализ пространственно-временного распределения.

Впервые организованы непрерывные детальные сейсмологические наблюдения в районе месторождений нефти и газа на севере о. Сахалин до начала активной фазы промышленной эксплуатации. Получены кондиционные данные, характеризующие сейсмический процесс. Это позволяет выработать объективные критерии распознавания наведенной сейсмичности, которая может развиваться в районе нефтегазовых месторождений в результате их многолетней эксплуатации.

Впервые для севера о. Сахалин выявлена закономерность возникновения сильнейших повторных землетрясений. В частности, наблюдаются повторные землетрясения спустя несколько месяцев, а далее спустя несколько лет после главного события. Магнитуда указанных событий сопоставима и зачастую превосходит магнитуду сильнейшего афтершока первых суток. Полученные в рамках настоящей работы результаты приводят к необходимости более глубокого изучения найденных закономерностей для физического объяснения наблюдаемых эффектов.

Теоретическая и практическая значимость. Последние годы характеризуются повышенным интересом ряда стран, в том числе и Российской Федерации, к шельфовым месторождениям углеводородов, в связи с истощением разведанных запасов сырья на суше. Однако, освоение шельфовых месторождений затруднено как технической сложностью их промышленной разработки и созданием инфраструктуры, так и высокими требованиями к экологической безопасности. Рассматривая возможности возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций при добыче углеводородов в шельфовых зонах (в том числе и в арктических условиях), необходимо указать на необходимость сейсмического мониторинга. Актуальность подобных наблюдений связана с необходимостью предотвращения возможных экологических катастроф, связанных с движениями грунта, возникающими при наведенной сейсмичности. Кроме того, возможность активизации наведенной сейсмичности должна учитываться при разработке арктических шельфовых месторождений углеводородов, так как

техническая сложность и, как следствие, стоимость ликвидации последствий экологических катастроф в условиях Арктики на порядок превышают сложность и стоимость аналогичных работ в низких широтах Земли. Это обосновывает высокую практическую значимость проведенных исследований и разработок в настоящей диссертации.

Разработанная комплексная автоматизированная система сейсмического мониторинга, кроме автоматических процессов, предоставляет многофункциональный интерфейс для разнопланового анализа зарегистрированных данных и результатов их обработки. Настоящая система является фундаментальной площадкой для работы с результатами сейсмологических наблюдений, объединяющей апробированные перспективные методы анализа данных для производства высокоточного аналитического результата с минимальным уровнем погрешности. Являясь основой для решения задач геодинамического мониторинга, автоматизированная система производит высококачественный материал для научных и прикладных исследований сейсмичности.

На текущий момент система мониторинга успешно апробирована и эксплуатируется в непрерывном режиме в ИМГиГ ДВО РАН. Результаты, содержащие рассчитанные параметры землетрясений, в оперативном режиме поставляются в ГУ МЧС РФ по Сахалинской области. Информация о локализации землетрясений с $M_L \geq 3.5$ размещена в публичном доступе (Сахалинский сейсмологический сервис реального времени: электронный ресурс¹). Кроме этого, исходный материал и каталоги землетрясений предоставляются научным коллективам ИДГ РАН и ИМГиГ ДВО РАН.

Разработанная модель пространственного распределения сейсмичности на севере о. Сахалин позволяет уточнить сейсмический потенциал отдельных разломно-блоковых геоструктур и пересмотреть карты сейсмического районирования.

Полученные результаты в области оценки параметров фоновой (естественной) сейсмичности позволяют выработать объективные критерии распознавания наведённой (триггерной) сейсмичности, которая может возникнуть в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин в результате их многолетней эксплуатации, а также могут быть использованы в последующем в широкой области производственной деятельности, которая приводит к «возбуждению» сейсмичности.

Исходный материал. В работе использовался региональный каталог землетрясений ($M \geq 3.5$) о. Сахалин за период с 1905 по 2005 гг., дополненный данными о сейсмичности Сахалина

¹ <http://imgg.ru/ru/srss>

до сентября 2006 г. Использовались цифровые (исходные) записи, а также результаты их обработки, сейсмических станций ИМГиГ ДВО РАН, ДВО РАН и СФ ГС РАН.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического указателя. Общий объём диссертации – 135 страниц, включая 7 таблиц и 42 рисунка. Библиографический указатель содержит 147 ссылок, включая 92 ссылки на иностранные источники.

Апробация результатов работы. Отдельные разделы работы были представлены на Второй региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (г. Петропавловск-Камчатский, 2009 г.), Международной научной конференции «11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference» (г. Албена, Болгария, 2011 г.), Международной научной конференции «33rd General Assembly of the European Seismological Commission» (г. Москва, 2012 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (г. Хабаровск, 2013 г.), Международной научной конференции «8th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes» (г. Саппоро, Япония, 2014 г.).

Степень личного участия автора. Исследования по теме диссертации были выполнены автором в лаборатории физики землетрясений ИМГиГ ДВО РАН.

Автором разработана архитектура автоматизированной комплексной системы мониторинга за естественной и наведённой сейсмичностью. Выполнена ее практическая реализация в рамках исполнения ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме «Разработка программно-технических решений в области мониторинга и управления сейсмическими рисками природного и техногенного характеров при промышленном освоении шельфовых нефтегазовых месторождений» (соглашение № 14.607.21.0105).

При непосредственном участии автора были подобраны места установки сейсмических станций в п. Ныш и с. Вал на севере о. Сахалин, выполнены работы по монтажу оборудования и оценке шумовых помех.

Автором была реализована телеметрическая сеть, объединяющая все действующие сейсмические станции ИМГиГ ДВО РАН на севере о. Сахалин, для непрерывной передачи зарегистрированных данных в режиме реального времени.

При непосредственном участии автора создан уникальный каталог слабых землетрясений на Северном Сахалине, насчитывающий более 1860 событий с магнитудой $M_L \geq 0$ за 2006-2014 гг.

Исследование сейсмического режима зон активных разломов о. Сахалин, в том числе изучение характера периодичности сильных землетрясений, с учётом промышленной разработки нефтегазовых месторождений в сейсмоактивной шельфовой области острова выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-31323 мол_а). Автор выступил в качестве руководителя гранта.

Полученные автором результаты использовались при выполнении работ по сейсмическому мониторингу в рамках коммерческих заказов компаний «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд» и «Эксон Нефтегаз Лимитед».

Автор выражает признательность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Алексею Валерьевичу Коновалову, научному консультанту д.ф.-м.н. Сергею Борисовичу Турунтаеву, а также сотрудникам ИМГиГ ДВО РАН члену-корреспонденту РАН Б.В. Левину, А.В. Гаврилову, А.С. Сычёву, К.А. Манайчеву, О.Л. Карташовой и И.Н. Тихонову за внимание и поддержку при выполнении работы и ценные советы. Автор также благодарит сотрудников этого же Института И.П. Кремневу и В.А. Клачкова за техническую помощь, оказанную при подготовке диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели, задачи работы, положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна, теоритическая и практическая значимость, апробация результатов работы, обозначен исходный материал.

Первая глава посвящена обзору известных случаев возникновения техногенной сейсмичности, напрямую связанной с промышленным освоением месторождений нефти и газа. В главе рассмотрены случаи индуцированных и триггерных землетрясений, выполнен критический обзор существующих в мировой практике программных продуктов и открытых систем для анализа зарегистрированной сейсмической информации. Определены сильные и слабые стороны каждой системы, пригодной для внедрения с целью проведения детальных сейсмологических наблюдений на Северном Сахалине. Рассмотрены существующие в мировой сейсмологической практике методы локализации очага, имеющие программные реализации на базе открытого исходного кода. Для каждого метода рассмотрен математический аппарат, определены сильные и слабые стороны.

Из представленного обзора следует, что для анализа проявлений естественной и техногенной сейсмичности необходим каталог землетрясений района промышленной разработки месторождений нефти и газа с данными о слабой сейсмичности. Наиболее перспективным подходом к решению этой задачи является организация и проведение непрерывных детальных сейсмологических наблюдений в непосредственной близости от промышленных объектов нефтегазовой индустрии до и после начала активной фазы промышленной эксплуатации.

Последнее десятилетие на севере о. Сахалин ведутся интенсивные работы по развитию нефтегазодобывающей отрасли. Триггерная сейсмичность представляет серьезную опасность при разработке месторождений. Кроме того, возможен механизм, при котором длительная эксплуатация месторождений может спровоцировать серию сильных землетрясений индуцированного или триггерного характера, в то время как произошедшие землетрясения могут стать триггерами более сильного сейсмического события вблизи активных геологических структур, как это, например, было в 2011 г. около города Прага (штат Оклахома, США) (Sumy D. F. [et al.] Observations of static Coulomb stress triggering of the November 2011 M5. 7 Oklahoma earthquake sequence // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. Т. 119, №. 3. С. 1904-1923.). В этой связи, для условий Северного Сахалина, ввиду интенсивной разработки месторождений углеводородов, необходима разработка комплексной автоматизированной системы мониторинга, с учётом локальных географических и геологических особенностей региона, направленной на обеспечение непрерывной регистрации, архивации и анализа сейсмологических данных.

В разделе 1.1. первой главы рассмотрена проблема наведённой сейсмичности в связи с промышленным освоением нефтегазовых месторождений, представлено описание предлагаемых взаимосвязанных механизмов, объясняющих причины проявления сейсмической активности в результате как отбора пластовых флюидов, так и закачки флюидов для случаев, когда такая активность имеет место в коллекторе, вблизи коллектора (над и под коллектором) и на расстоянии от него.

В разделе 1.2. первой главы рассматриваются случаи, когда промышленное освоение месторождений нефти и газа привело к ощутимому изменению сейсмического режима и возбуждению сильных землетрясений: землетрясение 7 мая 2001 г. ($M_w=4.4$) вблизи месторождения нефти Экофиск (Норвегия), проявления сейсмичности ($M\sim 4$) вблизи нефтегазового месторождения Лак (Франция), серия сильных землетрясений ($M\sim 7$) вблизи Газлийского газового месторождения (Узбекистан), Нефтегорское землетрясение 27 мая 1995 г. ($M_w=7.1$), Пильтунское землетрясение 12 июня 2005 г. ($M_w=5.6$) вблизи Пильтун-Астохского нефтегазового месторождения.

В разделе 1.3. первой главы обобщены модели триггерной/индуцированной сейсмичности, возникающей при промышленном освоении месторождений углеводородов. На основе известных в мировой горнопромышленной практике случаев, когда производственная деятельность на нефтегазовых месторождениях привела к ощутимому изменению динамики сейсмического режима, сделано предположение, что гидравлическая передача порового давления через разломы и систему трещин в массиве к местам, где комбинация эффективных напряжений в породе близка к критическим значениям, является главной причиной активизации сейсмичности.

В разделе 1.4. первой главы представлен обзор существующих в мировой сейсмологической практике программных продуктов с открытым исходным кодом для выполнения сейсмологических наблюдений. Программные продукты, в рамках обзора, условно разделены на две группы: системы обработки данных реального времени и системы постобработки. Рассмотрен функционал набора программных продуктов каждой из групп.

В разделе 1.5. первой главы рассмотрены методы определения параметров близких землетрясений по записям локальных сетей сейсмических станций: определение по одной станции, метод засечек, метод инверсии, метод двойных разностей.

В системе, рассматриваемой в настоящей работе, в качестве основного метода определения параметров землетрясений используется метод инверсии времен пробега сейсмических волн. Этот метод реализован в виде вычислительной программы HYPOCENTER (Lienert B. R., Havskov J. A computer program for locating earthquakes both locally and globally //

Seismological Research Letters. 1995. Т. 66, №. 5. С. 26-36.) для обработки с участием оператора и HYPOINVERSE (Klein F. W. User's Guide to Hypoinverse-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes (4/2002 version 1.0) // USGS Open File Report. 2001. 171P) для автоматических определений. Суть метода заключается в предположении, что разница в истинном положении очага и рассчитанном является малой величиной, так что остаточная разность может быть задана линейной функциональной зависимостью от поправки к истинному положению гипоцентра.

Рассчитанное время вступления t_i^{cal} (Р- или S-волны) на i -ой сейсмической станции может быть записано в виде

$$t_i^{cal} = t_0 + T(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0), \quad (1)$$

где t_0 – время в очаге и T – время пробега сейсмической волны, как функция координат станции (x_i, y_i, z_i) и координат гипоцентра (x_0, y_0, z_0) . Вследствие нелинейных соотношений между временами пробега и положениями землетрясений в общем случае используются усеченные ряды Тейлора для линеаризации уравнения (1). В этом случае разность измеренных и рассчитанных времен пробега линейно относится к поправкам – трем гипоцентральному параметрам и времени в очаге ($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$). Разлагая функцию времени пробега из уравнения (1) в ряд Тейлора по степеням поправок и оставляя лишь первые члены в разложении, найдем остаточную разность r_i (невязку):

$$r_i = \left(\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) \Delta x + \left(\frac{\partial T}{\partial y_i}\right) \Delta y + \left(\frac{\partial T}{\partial z_i}\right) \Delta z + \Delta t, \quad (2)$$

где

$$r_i = t_i^{obs} - t_i^{cal}, \quad (3)$$

где t_i^{obs} – измеренные времена пробега на i -ой сейсмической станции.

Данные уравнения комбинируются для всех станций, путем такого объединения (2) и (3), чтобы получить систему линейных уравнений в виде

$$W r = W G X, \quad (4)$$

где r – вектор остаточных разностей; G – матрица, содержащая частные производные; X – вектор неизвестных поправок, которые необходимо определить; W – диагональная матрица с весовыми поправками для каждого уравнения. Веса используются для учета четкости определения времен вступлений сейсмических волн в случае ручной обработки сейсмограмм. Для кросскорреляционных данных используется функция когерентности для рассматриваемых волновых форм.

Система линейных уравнений (4) с четырьмя неизвестными (три гипоцентральных параметра и время в очаге) решается путем минимизации остаточной разности методом наименьших квадратов, используя итеративный подход. В начале задается решение в виде рассчитанных времен пробега для рассматриваемых фаз (в некоторой области, где предположительно локализован очаг), которое затем проверяется для нахождения поправок к первоначально заданному положению, далее исправленное решение является входным и т.д. Этот метод был впервые предложен Гейгером (Geiger L. Probability method for determination of earthquake epicenters from the arrival times only // Bul. St. Louis Univ. 1912. Vol. 8. P. 60–71). Итеративный процесс обычно быстро сходится, если первоначальное определение гипоцентра близко к истинному местоположению очага.

Для расчёта локальной магниты используется решение вида (Коновалов А.В., Сычев А.С. Калибровочная функция локальной магнитуды и межмагнитудные связи для Северного Сахалина // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 75-86):

$$M_L = \log A + a \log R + b R + c, \quad (5)$$

где A – максимальная амплитуда поперечных волн в нм/с; R – гипоцентральное расстояние в км, $a = 1.84 \pm 0.26$, $b = 0.0011 \pm 0.0014$ и $c = -2.97 \pm 0.34$. Диапазон станционных поправок варьируется от -0.41 до $+0.14$.

Во второй главе рассмотрены особенности разработки автоматизированной системы сбора, передачи, хранения и обработки сейсмологических данных на Северном Сахалине. Разработана концепция развития автоматизированной системы детальных сейсмологических наблюдений, определены технические требования к системе: задан функциональный уровень, подобраны требования к сейсмической сети и вычислительным ресурсам, определены форматы данных, протоколы передачи информации, возможности масштабирования. Разработана уникальная архитектура комплексной автоматизированной системы мониторинга за естественной и наведенной сейсмичностью, объединяющая системы реального времени и постобработки. Созданная система отличается передовым функциональным уровнем, высокой надёжностью, возможностью прозрачного масштабирования. Разработка технологических компонент системы выполнена на базе современного и свободно распространяемого программного обеспечения с открытым исходным кодом.

В разделе 2.1. второй главы проанализированы предпосылки для создания системы сейсмологических наблюдений на севере о. Сахалин, указаны наиболее крупные нефтегазовые месторождения и даты начала активной фазы промышленной эксплуатации месторождений.

В разделе 2.2. и 2.3 второй главы рассмотрены концепция развития и технические требования автоматизированной системы детальных сейсмологических наблюдений на

Северном Сахалине с учётом локальных условий. Требования к системе и, в частности, к архитектуре системы были разработаны с учётом современных тенденций в мировой практике проведения сейсмологических наблюдений. Требования учитывают реализацию такой системы, которая, в конечном счете, способна регистрировать и обрабатывать слабую сейсмичность без пропусков. Вместе с тем, функциональность системы должна обеспечивать уровень обработки и представительность информации не ниже уровня действующих на сегодняшний день международных сейсмологических центров.

В разделе 2.4. второй главы показана архитектура и практическая реализация системы в условиях Северного Сахалина. Архитектура системы (Рисунок 1) была разработана с учётом существующей мировой практики построения прикладных информационных систем. Ключевые моменты, которые были учтены при разработке архитектуры – это высокая надёжность системы на всех этапах обработки данных, отказоустойчивость, прозрачное масштабирование и возможность тестирования и внедрения дополнительных программных модулей. Четыре основные службы системы имеют одновременный доступ к данным, расположенным в хранилище. Эти службы работают в отдельных виртуальных контейнерах с полным резервированием. Связь между службами системы осуществляется посредством стека протоколов TCP/IP.

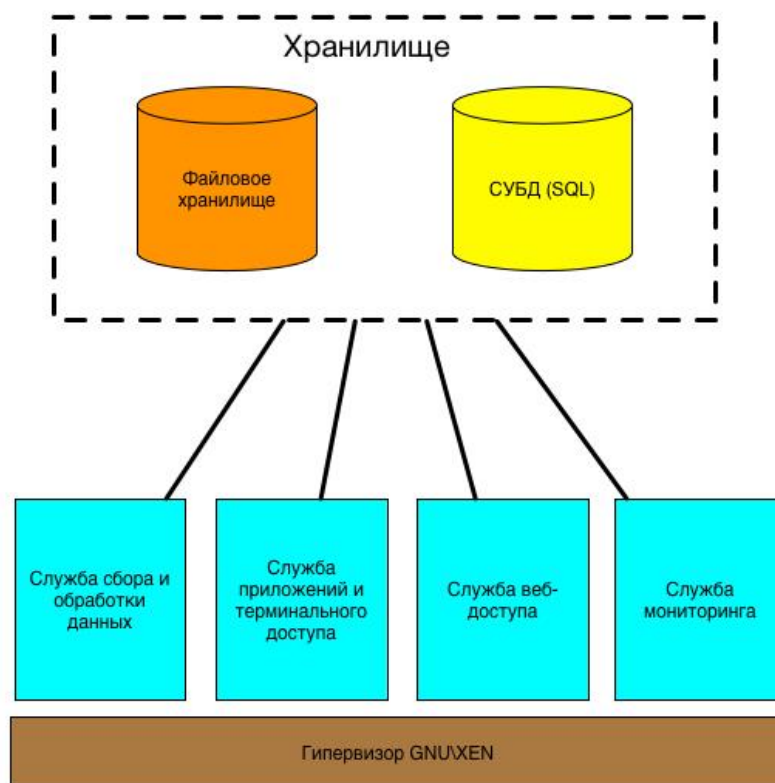


Рисунок 1. Архитектура системы.

В основе разработанной архитектуры лежит концепция виртуальной сейсмической сети (BCC) (Ottmoller L., Havskov J. SeisNet: A general purpose virtual seismic network // Seismological

Research Letters. 1999. Т. 70, №. 5. С. 522-528), в рамках которой выделяют понятия «сейсмический узел» и «центр обработки данных» (ЦОД). ВСС – это централизованная сеть, где цифровые данные, собранные с удаленных узлов, поступают в ЦОД – точку сбора информации – место, в котором осуществляется последующая обработка, анализ и хранение данных. Данные поступают в систему в режиме, близком к реальному времени, – информация собирается со всех узлов непрерывно, задержка может варьироваться от 5 секунд до 12 часов.

Разработанная архитектура системы учитывает локальные географические и геологические особенности региона. Разработанная архитектура системы обеспечивает:

- объединение в единую локальную сеть сейсмических станций до 250 удалённых узлов;
- прозрачное масштабирование при добавлении аппаратных и программных компонент;
- дублирование программных компонент средствами виртуализации.

Жизненный цикл данных показан на Рисунке 2.

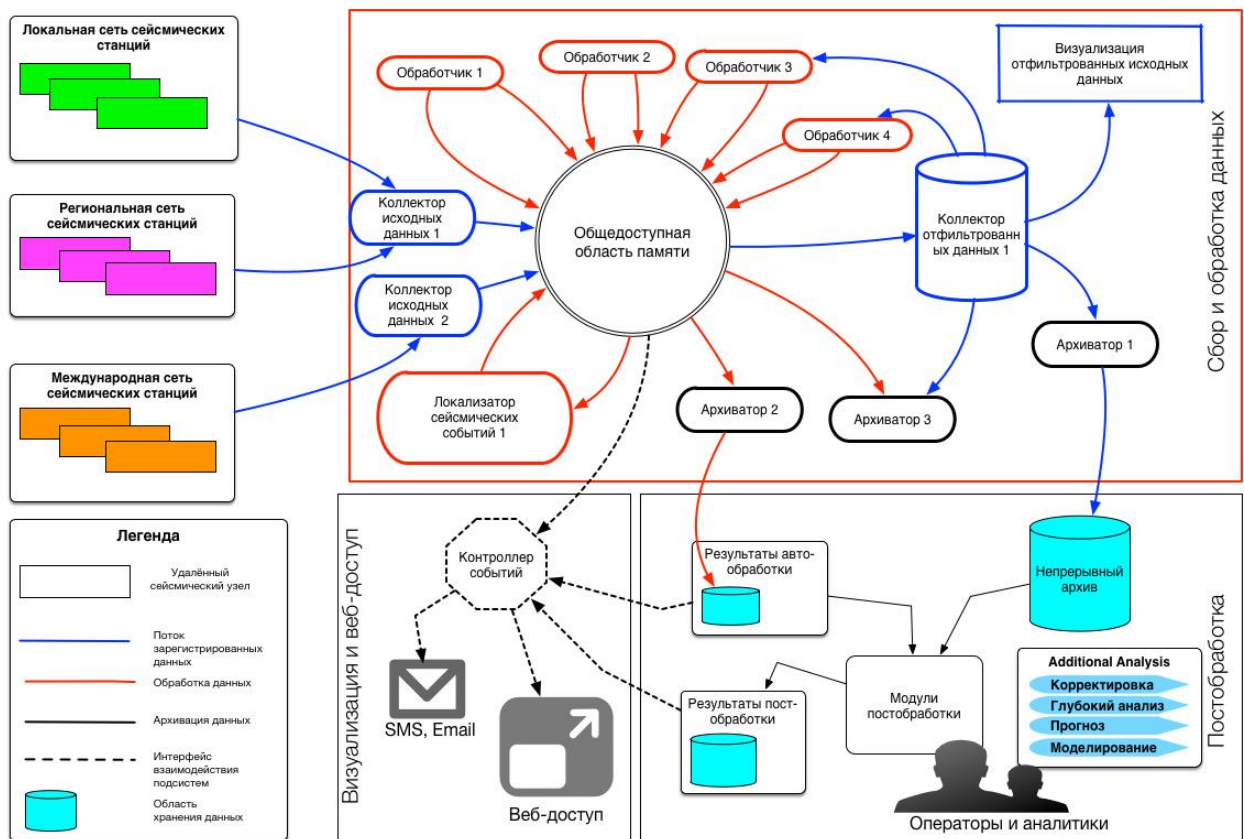


Рисунок 2. Жизненный цикл данных в системе.

Программно-аппаратное обеспечение центра обработки данных (ЦОД) реализует основной функционал системы (Рисунок 2). Аппаратное обеспечение ЦОД составляет массив производительных x86 совместимых вычислительных машин, укомплектованных 48 центральными процессорами INTEL XEON. Общая ёмкость оперативной памяти составляет

более 200 гигабайт, дисковое пространство – более 10 терабайт. Системное ПО ЦОД представлено разнообразием программ GNU/Linux и систем виртуализации XEN. В качестве основного прикладного ПО ЦОД были выбраны системы EARTHWORM для обработки данных в режиме реального времени и SEISAN для выполнения операций постобработки. Данные системы, выбранные на основе обзора программных продуктов, по мнению автора, представляют наиболее высокий функциональный уровень, обладают наилучшими инструментами и документацией для интеграции собственных программ, реализующих дополнительные методы анализа данных.

В настоящее время на Сахалине и сопредельных территориях функционирует локальная сейсмическая сеть, состоящая из 23 пунктов наблюдений (Рисунок 3). Каждая станция непрерывно регистрирует информацию о движении грунта, представляет собой удаленный сейсмический узел, в рамках концепции ВСС, и составляет часть единой системы сейсмического мониторинга.



Рисунок 3. Действующая сеть сейсмических станций на севере о. Сахалин и сопредельных территориях. Зелёным цветом выделены станции ИМГиГ ДВО РАН, синим – ДВО РАН, чёрным – СФ ГС РАН, красным – IRIS GSN, жёлтым – Хоккайдского университета (Япония).

Обработка данных выполняется в три этапа. На первом этапе данные с удалённых сейсмических узлов регистрируются в системе. После процедуры первичной фильтрации непрерывные волновые формы в унифицированной форме TRACEBUFF2 ПО EARTHWORM находятся в специальной области памяти системы и доступны для параллельной обработки модулями системы реального времени. Поступившие данные проходят фильтрацию по заданным правилам, что позволяет отсеять дублирующие пакеты и пакеты с ошибочными временными метками в заголовке. Далее выполняется анализ волновых форм по протоколу STA/LTA (Allen R. Automatic phase pickers: their present use and future prospects // Bulletin of the Seismological Society of America. 1982. Т. 72, №. 6B. С. S225-S242) на основе независимых для каждого цифрового канала параметров. На основе выявленных возможных времён вступлений волновых форм специальные подпрограммы ассоциируют эту информацию с возможными сейсмическими событиями, выполняют проверки с целью подтверждения факта возникновения сейсмического события, определяют локальную магнитуду, координаты и глубину гипоцентра землетрясения. Для выполнения этих операций используются более 100 управляющих параметров, отдельный массив калибровочных параметров для каждой сейсмической станции и единая для Северного Сахалина скоростная модель строения земной коры. Независимый процесс выполняет архивацию непрерывного потока волновых форм на диск в формате BUD/MiniSEED, обеспечивает интеграцию с системой SEISAN.

На следующем этапе выполняются операции постобработки. В первую очередь, это уточнение параметров автоматических определений, составление каталогов сейсмических событий, формирование бюллетеней. На этом этапе выполняется всесторонний анализ землетрясений: определение моментной магнитуды и тензора сейсмического момента, применение различных скоростных моделей для анализа погрешностей, построение синтетических сейсмограмм, визуализация исходных данных и результатов обработки. Для работы с данными был подготовлен специальный набор правил, регламентирующий коллективную работу над единым набором данных и конфигурационных файлов. Глобальные конфигурационные файлы, в которых задаются скоростная модель, калибровочные параметры станций, настройки программы визуализации, могут быть изменены исключительно администратором системы после принятия соответствующего решения. Калибровочные файлы станций также имеют статус глобальных параметров и доступны в директории CAL дистрибутива SEISAN. После внесения изменений в глобальные параметры системы осуществляется обновление всех событий в БД при помощи команды «update». С другой стороны, каждый пользователь системы может создать собственные файлы в домашней директории, в случае, если такие конфигурационные файлы будут обнаружены в директории пользователя, система будет использовать пользовательские параметры вместо глобальных. Эти

изменения не коснутся других участников системы. Такой подход позволяет предоставить каждому специалисту возможность изменить глобальные параметры только в рамках собственной сессии.

Завершающий этап – это публикация рассчитанных параметров об умеренных и сильных ($M_L \geq 3.5$) землетрясениях на специальном веб-портале (Сахалинский сейсмологический сервис реального времени: электронный ресурс²). Разработанный автором контроллер событий отслеживает автоматические определения, результаты обработки с участием оператора для каждого уникального сейсмического события и передаёт информацию во внешнее веб-приложение. Контроллер событий реализован в виде скрипта BASH.

В третьей главе рассмотрены особенности конфигурации разработанной системы сейсмического мониторинга для условий Северного Сахалина, показан анализ погрешности определений, дана оценка представительности данных, представлены результаты апробации подсистемы автоматических определений. Для эффективного выполнения сейсмического мониторинга в условиях малого числа станций и сложной шумовой обстановки была решена задача повышения точности определения координат гипоцентров событий, понижения порога чувствительности сейсмической сети, автоматизации и ускорения обработки получаемых записей землетрясений.

В разделе 3.1. третьей главы рассмотрен процесс определения скоростной модели строения земной коры для Северного Сахалина, которая выступает определяющим параметром системы. Модель кардинальным образом влияет на точность определения координат и глубины гипоцентра. Опираясь на сейсмические исследования земной коры Северного Сахалина были подобраны оптимальные параметры скоростной модели для системы.

В разделе 3.2. третьей главы показан анализ погрешности определений и представительности данных. Для этих целей был исследован каталог землетрясений севера о. Сахалин с магнитудой $M_L \geq 0$ с сентября 2006 г. по апрель 2015 г. За это время системой было зарегистрировано более 1860 сейсмических событий, все события локализованы.

Распределение среднеквадратичной величины невязки (Рисунок 4 а) для рассматриваемого каталога землетрясений не превышает 0.4 с, а для 95% случаев не превышает 0.3 с, что согласуется с априорной оценкой и техническими требованиями к системе. Более 75% очагов землетрясений локализованы по трем и более станциями (Рисунок 4 б). Брешь азимутального покрытия сетью наблюдений при локализации очага составляет более 120 градусов. (Рисунок 4 в), что очевидно связано с меридиональным расположением станций –

² <http://imgg.ru/ru/srss>

вдоль острова (Рисунок 3). Около 40% от общего числа землетрясений соответствует брешам в интервале 330-360 гр. Эти землетрясения произошли за пределами сети наблюдений – либо значительно севернее станции «Оха» (ОКНА), либо южнее станции «Тымовское» (TMSK, TYV). Такие события, как правило, удается зарегистрировать и локализовать не более чем двумя станциями (Рисунок 4 б).

Следует отметить, что меридиональное расположение сети наблюдений осложняет локализацию землетрясений. Об этом свидетельствуют параметры рассеяния в определении координат гипоцентров, приведенные на Рисунке 5. Распределение эллипсов ошибок показало, что наиболее уязвимый параметр, помимо глубины очага, – долгота. Однако при субширотном удалении от сети разброс ошибок заметно уменьшается.

Кроме того, выполнен сравнительный анализ результатов определений параметров сильных землетрясений, произошедших в 2006-2014 гг. на Северном Сахалине, согласно каталогам NEIC, СФ ГС РАН и данным локальной сети. Несмотря на ожидаемые расхождения с международными агентствами, погрешность определения координат гипоцентра локальной сетью не превосходит 10 км, а зачастую характеризуется меньшими значениями. Для слабых событий (с $M \sim 2.0$) следует ожидать более высокое рассеяние в определении координат гипоцентров. Это связано с тем, что такие события удается зарегистрировать всего несколькими станциями. Однако, когда речь идет о стабильной работе всех станций, то даже слабые события уверенно регистрируются более чем тремя станциями и, следовательно, такие события характеризуются схожими погрешностями определений, что и землетрясения с магнитудой $M_L \geq 3.0$.

Таким образом, обоснована точность определений параметров гипоцентров землетрясений ($M_L \geq 0$): погрешность в определениях широты ($\Delta\phi$), долготы ($\Delta\lambda$) эпицентра и глубины очага (ΔH) для 80% зарегистрированных событий не превышает 10 км. Обоснована представительность каталога землетрясений севера о. Сахалин с 50.0 по 55.0 гр. с.ш., с 140.5 по 145.0 гр. в.д. по магнитуде $M_L \geq 2$.

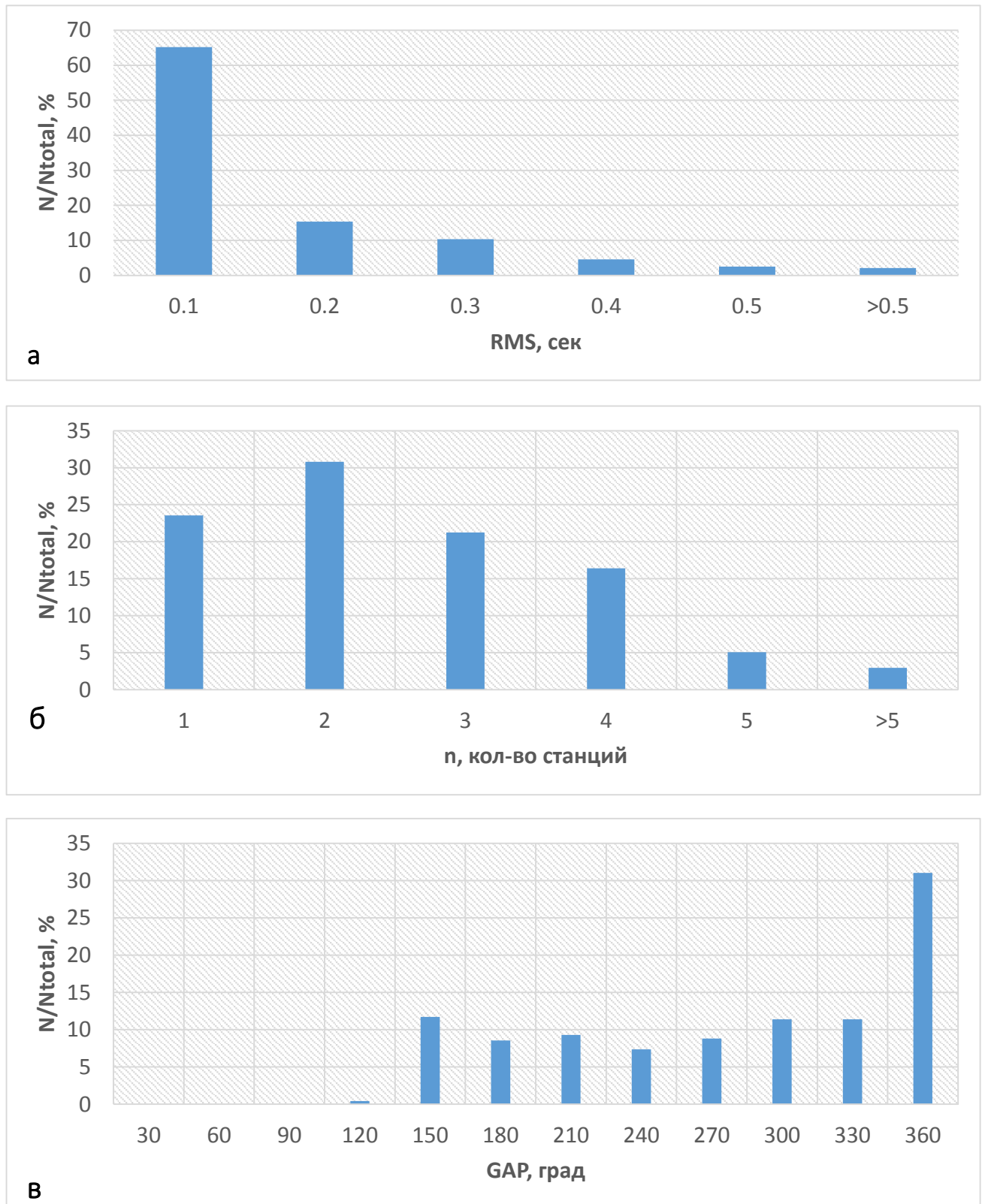


Рисунок 4. Гистограммы рассчитанных параметров: а – среднеквадратичная величина невязки (RMS); б – количество используемых станций (n); в – брешь азимутального покрытия сетью наблюдений при локализации очага (GAP).

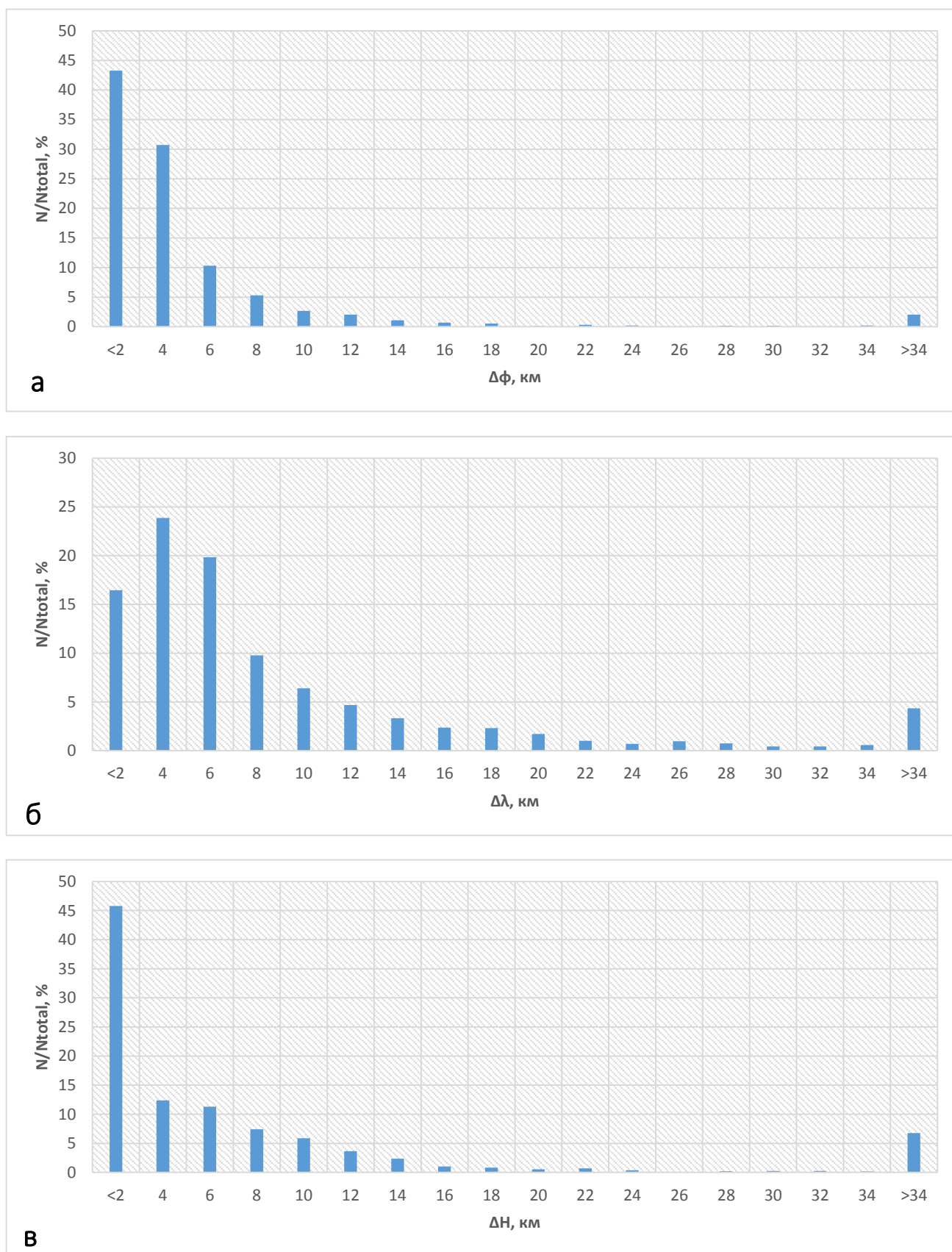


Рисунок 5. Распределение погрешностей определений; а – широты ($\Delta\phi$); б – долготы ($\Delta\lambda$); в – глубины (ΔH).

По данным каталога землетрясений ($M_L \geq 0$) севера о. Сахалин с сентября 2006 г. по апрель 2015 г. были построены плотностной и кумулятивный графики повторяемости (Рисунок 6). Анализ кумулятивного графика повторяемости позволяет оценить уровень представительности каталога, т.е. энергетической величины землетрясений, регистрируемых без пропусков. Как видно из рисунка, интервал представительных магнитуд соответствует от 2.0, в пределах которого зависимость частоты событий от магнитуды аппроксимируется лог-линейным соотношением Гуттенберга-Рихтера. Залом графика для магнитуд $M_L < 2$ очевидно связан с тем, что землетрясения в этом диапазоне регистрируются сейсмической сетью не в полном объёме.

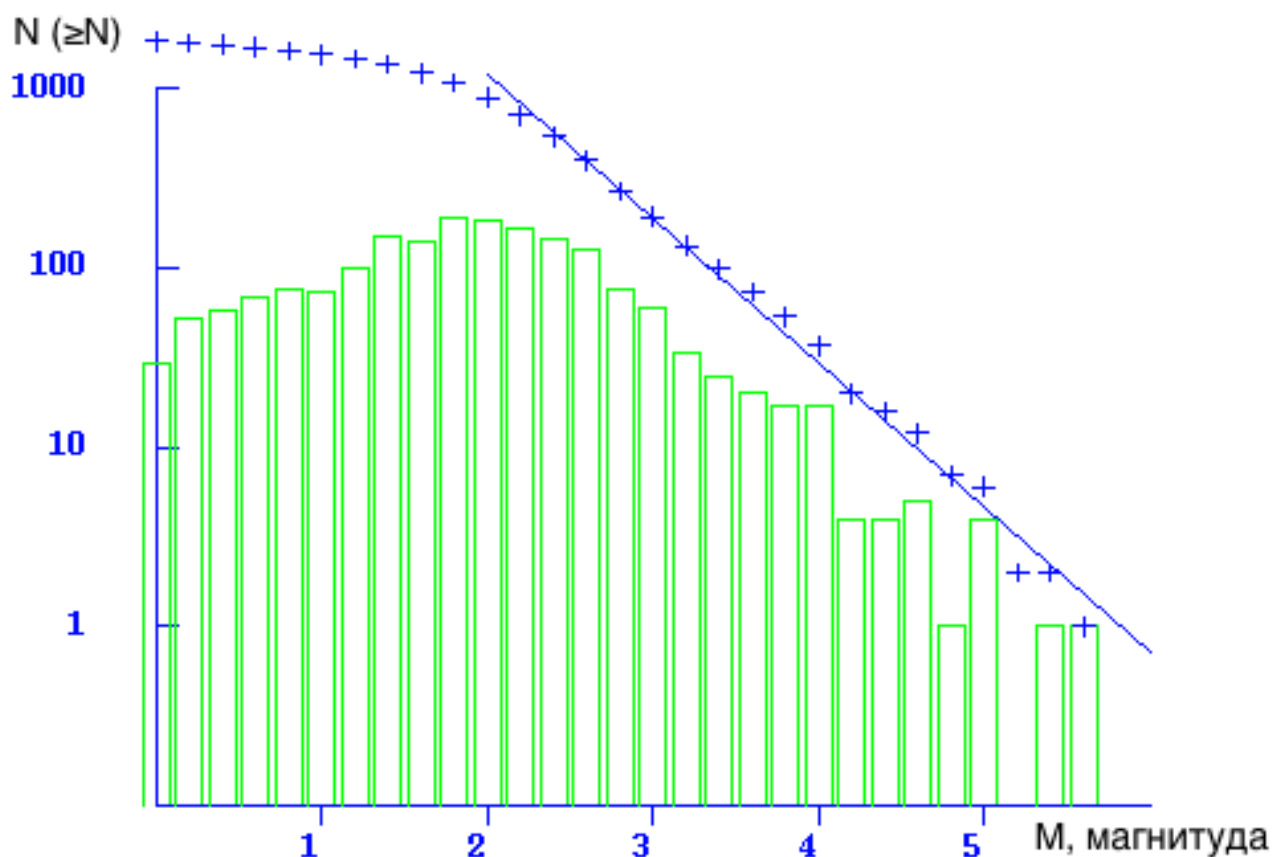


Рисунок 6. Кумулятивный график повторяемости Гуттенберга-Рихтера и аппроксимирующее лог-линейное соотношение. Гистограмма отображает плотностное распределение повторяемости.

В разделе 3.3. третьей главы показана апробация автоматической обработки системы на примере роя землетрясений июня-июля 2014 г. в ГО «МО Ногликский» в период с 27 июня по 7 июля 2014 г на севере о. Сахалин. За этот период вблизи пгт. Ноглики системой зарегистрировано (в т.ч. с участием оператора) по четырём и более станциям 64 землетрясения, сильнейшее событие произошло 30 июня 2014 г. в 20:58 $M_L = 4.5$ (Рисунок 7). Количество идентифицированных оператором землетрясений с $M_L > 2.5$ составило 22, из них автоматически зарегистрировано и локализовано 21 сейсмическое событие. Эксперимент показывает, что

запущенная в промышленную эксплуатацию комплексная система мониторинга за естественной и наведённой сейсмичностью уверенно регистрирует в автоматическом режиме сейсмические события с магнитудой $M_L \geq 2.5$. Пониженный порог регистрации в данном случае обусловлен тем, что серия землетрясений произошла в центре действующей сети сейсмических станций. Очевидно, что увеличение плотности сети сейсмических станций на севере о. Сахалин позволит снизить магнитудный порог автоматического детектирования сейсмических событий, и, тем самым, улучшить представительность каталога землетрясений, получаемого в режиме реального времени.

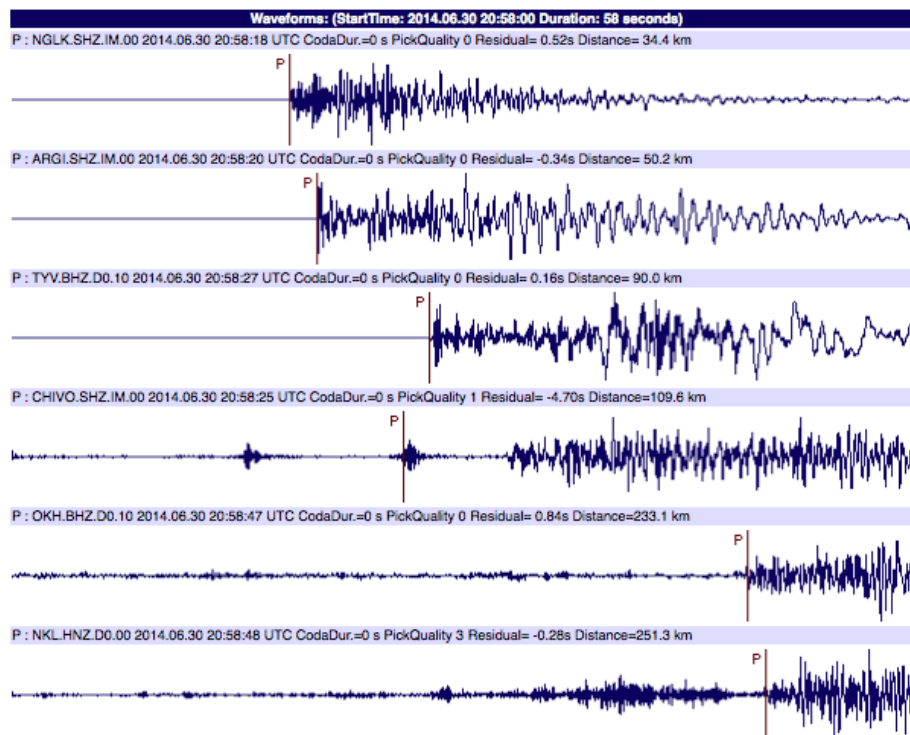


Рисунок 7. Автоматически определённые времена вступления Р-волн для землетрясения с $M_L=4.5$

В четвёртой главе рассмотрена современная сейсмическая обстановка ($M \geq 2$) Северного Сахалина и его восточного шельфа.

В разделе 4.1. и 4.2. четвёртой главы показаны результаты исследования сейсмичности в контексте активных геоструктур Северного Сахалина на основе анализа каталога местных землетрясений (869 событий) с локальной магнитудой $M_L \geq 2.0$, зарегистрированных системой с сентября 2006 г. по июнь 2014 г. Установлено, что области повышенной сейсмичности приурочены к сейсмогенным зонам сильных землетрясений. Четко прослеживается пространственное группирование землетрясений вдоль главных разрывных дислокаций. В некоторых случаях группирование землетрясений более рассеянное. Отмечены области пониженной сейсмичности (Рисунок 8).

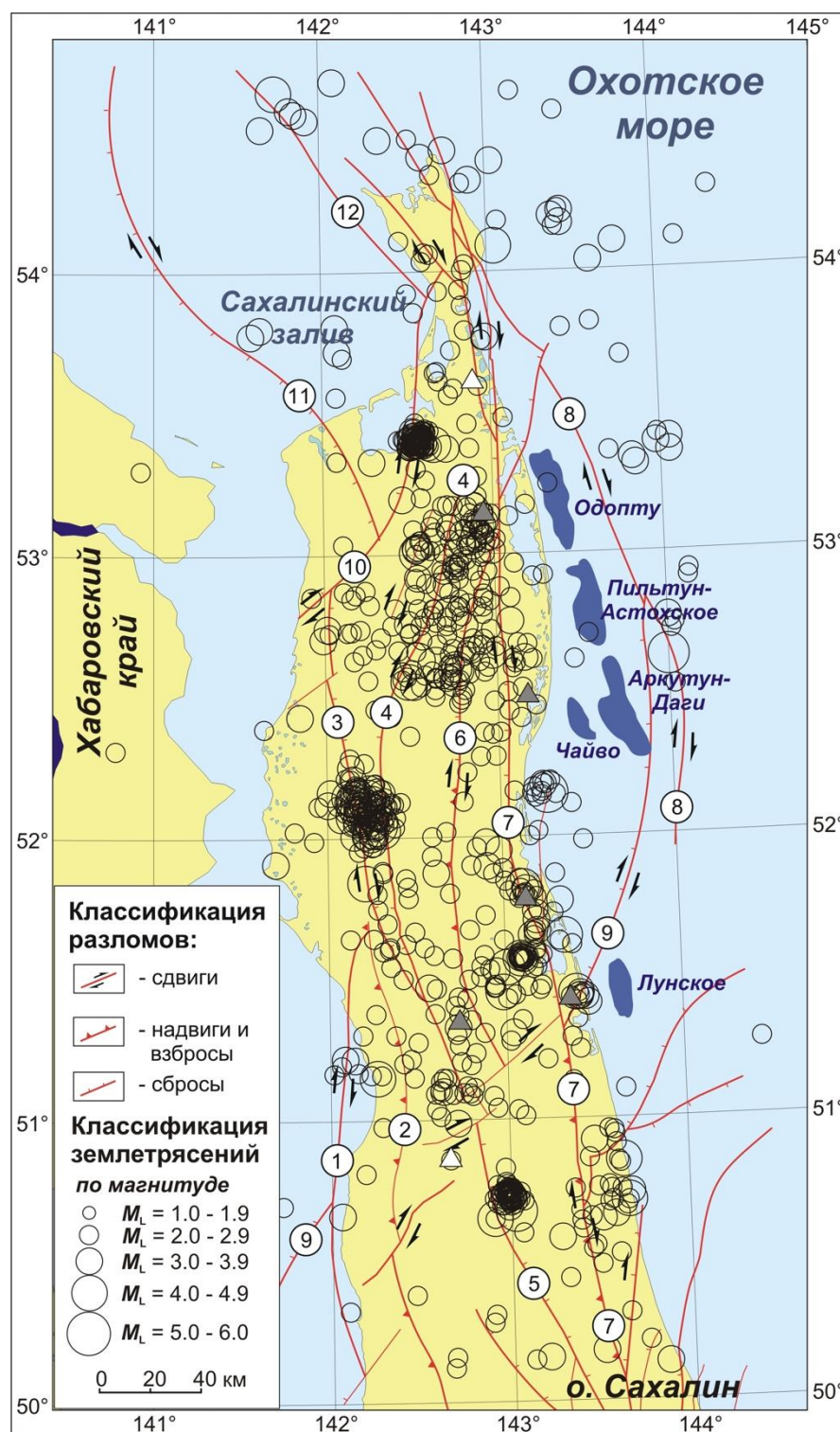


Рисунок 8. Пространственное распределение эпицентров коровых землетрясений с $M_L \geq 2.0$, зарегистрированных с сентября 2006 г. по июнь 2014 г. Список закартированных разломов (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.):

1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Западно-Энгизпальский; 4 – Гыргыланьинский; 5 – Срединно-Сахалинский; 6 – Верхне-Пильтунский; 7 – Хоккайдо-Сахалинский; 8 – Восточно-Сахалинский; 9 – Аукан-Лунский; 10 – Восточно-Байкальский; 11 – Лиманский; 12 – Западно-Шмидтовский.

В разделе 4.3. четвёртой главы показаны результаты анализа Пильтунского землетрясения 2005 г. ($M_w=5.6$). По совокупности независимых определений механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. (Коновалов А.В [и др.]. Пильтунское землетрясение 12 июня 2005 г. ($M_w=5.6$) и современная сейсмичность в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 1. С. 61-71) установлено, что землетрясение с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия и связано с перемещением по Фронтальному глубинному разлому, расположенному в основании восточного крыла Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны. Направление простирания одной из плоскостей разрыва параллельно ориентации этой зоны и ее максимальных поднятий. Это позволяет сделать вывод, что подвижка в очаге произошла по плоскости, падающей на запад. Современная сейсмическая активность северо-восточной шельфовой зоны отнюдь не ограничивается районом Пильтунского землетрясения. Землетрясения происходят в пределах Фронтального глубинного разлома, протяженность которого составляет приблизительно 250-300 км, и имеют группированный характер.

В разделе 4.4. четвёртой главы отражены результаты исследования очаговых зон сильных землетрясений. Установлено, что в очаговых зонах сильных землетрясений на севере о. Сахалин наблюдаются повторные землетрясения спустя несколько месяцев, и далее спустя несколько лет после главного события. Магнитуда указанных событий сопоставима либо превосходит магнитуду сильнейшего афтершока первых суток (Рисунок 9, 10, 11, 12).

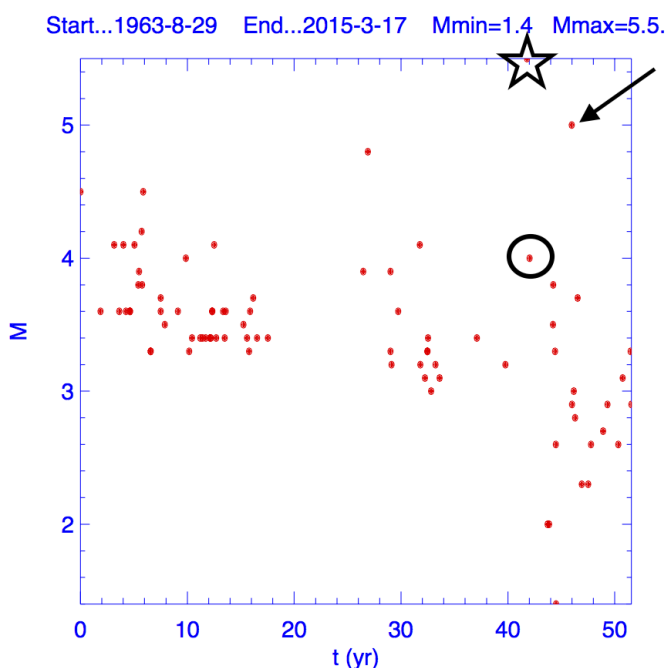


Рисунок 9. Историческая сейсмичность в зоне Пильтунского землетрясения. Звездой обозначено главное событие ($M=5.5$) 12 июня 2005 г.; овалом – сильнейшее повторное событие ($M=4.0$) 5 сентября 2005 г.; стрелкой – событие ($M=5.0$) 22 августа 2009 г.

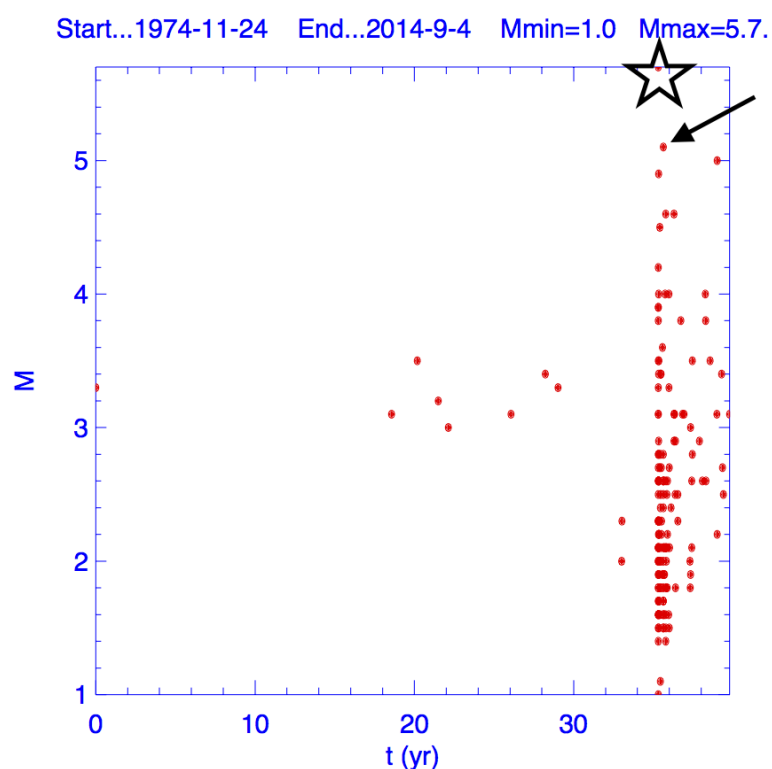


Рисунок 10. Историческая сейсмичность в зоне Уангского землетрясения. Звездой обозначено главное событие ($M=5.7$) 16 марта 2010 г.; стрелкой – сильнейшее повторное событие ($M=5.1$) 9 июля 2010 г.

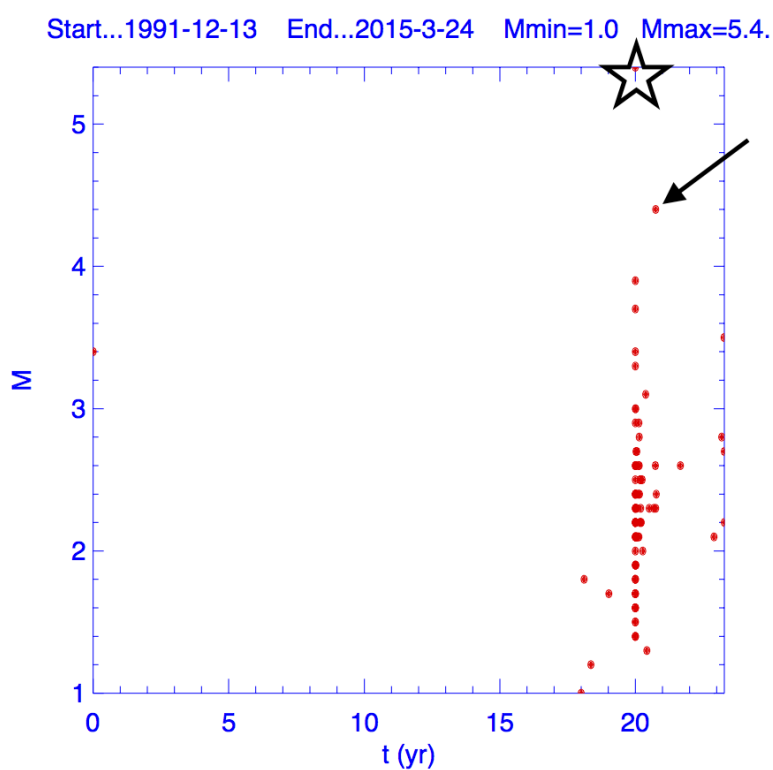


Рисунок 11. Историческая сейсмичность в зоне Тымовского землетрясения. Звездой обозначено главное событие ($M=5.4$) 12 декабря 2011 г., стрелкой – сильнейшее повторное событие ($M=4.4$) 11 сентября 2012 г.

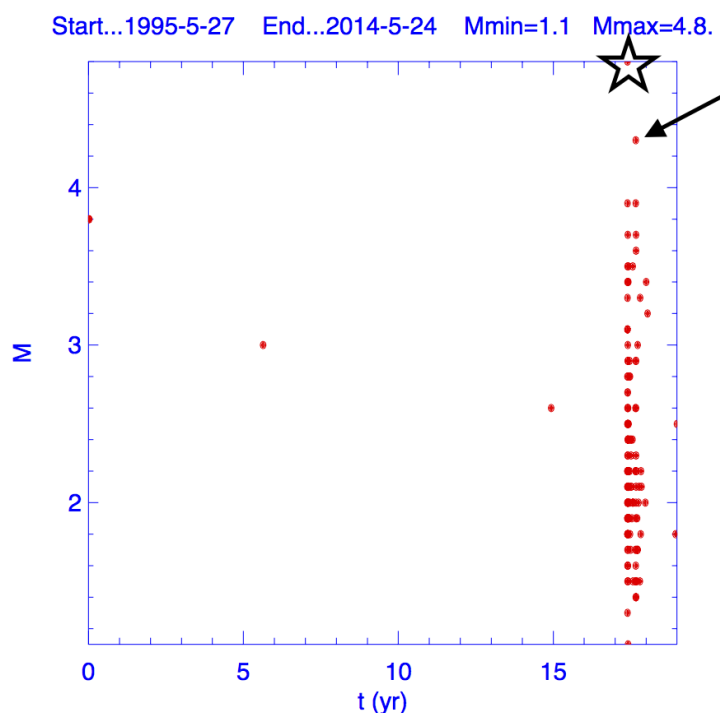


Рисунок 12. Историческая сейсмичность в зоне Охинского землетрясения. Звездой обозначено главное событие ($M=4.8$) 21 октября 2012 г.; стрелкой – сильнейшее повторное событие ($M=4.4$) 24 января 2013 г.

Закключение. Последнее десятилетие на севере о. Сахалин ведутся интенсивные работы по развитию нефтегазодобывающей отрасли. При этом районы промышленной разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и подавляющая часть сопутствующей инфраструктуры расположены в зоне активных тектонических нарушений разного ранга и возраста, выявленных по результатам многочисленных геолого-геофизических исследований. В этой связи можно надеяться, что результаты, полученные в данной работе, будут востребованы для уточнения сейсмического потенциала шельфа о. Сахалин и будут учитываться при инженерно-сейсмологических изысканиях.

Вместе с тем, опыт, полученный в данной работе, можно будет в дальнейшем применять для выработки объективных критериев распознавания сейсмичности, которая может развиваться в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин в результате их многолетнего промышленного освоения.

Публикации по теме диссертации

1. Коновалов А.В., Степнов А.А., Гаврилов А.В. Автоматизация рутинной обработки сейсмологических данных с использованием программного комплекса «SEISAN» // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Вторая региональная научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский: тез. докл. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2009. С. 151.

2. Степнов А.А., Коновалов А.В. Организация автоматизированного рабочего места сейсмолога с использованием программных компонент пакета «SEISAN» // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: V Сахалинская молодежная научная школа, Южно-Сахалинск, 8-11 июня 2010 г.: тезисы докладов / отв. ред. О.Н. Лихачева. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 2010. С. 31-33.

3. Konovalov A., Gavrilov A., Stepnov A. Induced seismicity monitoring in the oilfield production areas, north-eastern offshore zone of Sakhalin Island // 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2011), June 20-25, 2011, Albena, Bulgaria. Sofia : INT SCIENTIFIC CONFERENCE SGEM. 2011. Vol. I. P. 521-528.

4. Konovalov A.V., Stepnov A.A. and Patrikeev V.N. SEISAN Software Application for Developing an Automated Seismological Data Analysis Workstation // Seismic Instruments. 2012. Т. 48, № 3. С. 270-281.

5. Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottemoller L. The induced seismicity monitoring system in Northern Sakhalin (Russia) based on SEISAN and SEISNET software // Abstracts (GA ESC 2012), 19-24 August 2012, Moscow and Young Seismologist Training Course (YSTC 2012), 25-30 August 2012. Obninsk – M., PH «Poligrafikwik». 2012. С. 264.

6. Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В. Архитектура автоматизированной системы сейсмологических наблюдений на севере о. Сахалин // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: материалы всероссийской научно-практической конференции, 25-27 июня 2013, г. Хабаровск. Издательство Тихоокеанского государственного университета, 2013. С. 330-334.

7. Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottemoller L. New Architecture of an Automated System for Acquisition, Storage, and Processing of Seismic Data // Seismic Instruments. 2014. Vol. 50, № 1. P. 67-74.

8. Stepnov, A.A. REALTIME SEISMIC MONITORING SYSTEM IN NORTHERN SAKHALIN // 8th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes: Finding clues for science and disaster mitigation from international collaboration abstract submission, 22-26 September 2014. Sapporo: Hokkaido University. 2014. – URL: <http://hkdrcep.sci.hokudai.ac.jp/map/jkasp2014/pdf/R7.pdf>

9. Коновалов А.В., Патрикеев В.Н., Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Семенова Е.П., Степнов А.А. Пильтунское землетрясение 12 июня 2005 г. ($M_w=5.6$) и современная сейсмичность в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 1. С. 61-71.