

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель –
кандидат физико-математических наук
Коновалов Алексей Валерьевич

Южно-Сахалинск

2015 г.

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор: проблема техногенной сейсмичности в районах месторождений углеводородов и методы регистрации техногенных сейсмических явлений.....	12
1.1. Проблема наведенной сейсмичности в связи с промышленным освоением нефтегазовых месторождений	12
1.2. Обзор сейсмичности, связанной с извлечением углеводородов и закачкой жидкости .	17
1.3. Модели триггерной/индуцированной сейсмичности, возникающей при промышленном освоении месторождений углеводородов	30
1.4. Критический обзор современных программных продуктов для сейсмологических наблюдений.....	34
1.5. Методы определения параметров близких землетрясений по записям локальных сетей сейсмических станций и оценка магнитуды.....	38
1.6. Выводы.....	47
Глава 2. Разработка автоматизированной системы сбора, передачи, хранения и обработки сейсмологических данных на Северном Сахалине	49
2.1. Предпосылки для создания и развития сети детальных сейсмологических наблюдений	49
2.2. Концепция развития автоматизированной системы детальных сейсмологических наблюдений на Северном Сахалине.....	51
2.3. Технические требования к системе	54
2.4. Архитектура и практическая реализация системы на примере сети детальных сейсмологических наблюдений на Северном Сахалине	62
2.5. Выводы	70
Глава 3. Анализ погрешностей созданной автоматизированной системы сейсмологических наблюдений.....	71
3.1. Скоростная модель строения земной коры для Северного Сахалина.....	71
3.2. Анализ погрешностей определений и представительности данных	76
3.3. Результаты автоматической обработки системы на примере роя землетрясений июня-июля 2014 г. в ГО «Ногликский».....	84

3.4. Выводы	89
4. Современная сейсмическая обстановка ($M \geq 2$) Северного Сахалина и его восточного шельфа	90
4.1. Историческая сейсмичность и активные геоструктуры региона	90
4.2. Пространственное распределение сейсмичности ($M \geq 2$). Уточнение сейсмогеологической модели	94
4.3. Пильтунское землетрясение 2005 г. ($M_w=5.6$). Параметры очага, характер напряженного состояния и геологическая обстановка	103
4.4. Особенности постсейсмического процесса	117
4.5. Выводы	121
Заключение	123
Список литературы	125

Введение

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 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 подтвержденные 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 землетрясений 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 ($\Delta\varphi$), 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, объединяющая 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 до

¹ <http://imgg.ru/ru/srss>

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

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.).

Публикации результатов работы. Основные результаты работы опубликованы в следующих статьях и тезисах:

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. T. I. C. 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. T. 48, № 3, C. 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 «Poligrafizdat». 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, Т. 50. № 1, С. 67–74.

8. Stepnov, A.A. REALTIME SEISMIC MONITORING SYSTEM IN NORTHERN SAKHALIN [Electronic resours] / A.A. Stepnov // 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. (Mw=5.6) и современная сейсмичность в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 1. С. 61-71.

Степень личного участия автора. Исследования по теме диссертации были выполнены автором в лаборатории физики землетрясений Института морской геологии и геофизики 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 пгт. Ноглики, 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 Института морской геологии и геофизики ДВО РАН члену-корреспонденту РАН Б.В. Левину, А.В. Гаврилову, А.С. Сычёву, К.А. Манайчеву, О.Л. Карташевой, И.Н. Тихонову за внимание и поддержку при выполнении работы и ценные советы. Автор также благодарит сотрудников этого же Института И.П. Кремневу, В.А. Клачкова за техническую помощь, оказанную при подготовке диссертации.

Глава 1. Обзор: проблема техногенной сейсмичности в районах месторождений углеводородов и методы регистрации техногенных сейсмических явлений.

Последние годы характеризуются интенсивным развитием нефтегазодобывающей индустрии на о. Сахалин, в том числе его северо-восточном шельфе. 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 естественной и техногенной сейсмичности. В настоящей главе рассматриваются известные в мире случаи возникновения сейсмичности, связанной с разработкой месторождений нефти и газа, и обосновывается, таким образом, необходимость проведения детальных сейсмологических наблюдений, анализа современной сейсмичности и создания комплексной автоматизированной системы мониторинга за естественной и техногенной сейсмичностью на Северном Сахалине.

1.1. Проблема наведенной сейсмичности в связи с промышленным освоением нефтегазовых месторождений

Известно, что при эксплуатации месторождений нефти и газа возникают различные явления, приводящие к нежелательным экологическим последствиям. К их числу относятся нарушения природного механического равновесия в зоне коллектора, в первую очередь, за счет отбора флюида и соответствующего изменения баланса механических напряжений, как в зоне коллектора, так и в окружающей толще. Это проявляется в виде различных сеймотектонических деформаций: техногенной (наведенной) сейсмичности и относительно быстрых новейших тектонических деформаций, в частности, оседании земной поверхности.

Приуроченность землетрясений к коллекторам углеводородов является основной исходной базой для создания теорий происхождения техногенных землетрясений. Данные, полученные в результате сейсмологических исследований подобных землетрясений, такие как их магнитуда, фокальные механизмы, перепады напряжений и другие, использованы для обоснования существования процессов, которые могут быть причиной проявления сейсмической активности, имеющей видимую пространственную связь с коллектором. Существует несколько 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.

Классический случай техногенных землетрясений внутри коллектора углеводородов – гидроразрыв пласта, осуществляемый при нагнетании жидкости под давлением, достаточным для инициирования процесса образования трещин, а также горные удары. У исследователей фактически нет в толковании механизма землетрясений внутри коллектора углеводородов. Обычно указывают на следующие факторы: 1) изменение порового или трещинного давления жидкости; 2) изменение коэффициента трения вдоль трещин сдвига, ориентированных в соответствии с региональным полем напряжений. Например, если флюиды удаляются из занимаемого ими пористого пространства, порода сжимается. Отбор пластовых флюидов приводит к снижению порового давления в коллекторе, что замедляет фрикционное смещение и блокирует сбросы внутри коллектора. С другой стороны, снижение давления повышает эффективное вертикальное напряжение, вызывающее уплотнение пород коллектора. Воздействие упругих напряжений в пористой среде приводит к меньшему изменению горизонтальных напряжений по сравнению с вертикальными (Segall P., Fitzgerald S. D. A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs // *Tectonophysics*. 1998. Т. 289. №. 1. С. 117-128). Результирующий эффект заключается в стимулировании нормального сбросообразования в растягиваемом тектоническом пространстве. Этот эффект особо четко выражен вблизи границ коллектора, где перепады поровых давлений вызывают концентрацию напряжений.

Землетрясения, которые могли быть вызваны антропогенной деятельностью, наблюдались в пределах нескольких километров от некоторых продуктивных пластов. Теорией, объясняющей возникновение таких землетрясений, является модель упругого поведения коллектора, предложенная Сегалом (Segall P. Induced stresses due to fluid extraction from axisymmetric reservoirs // *Pure Appl. Geophys.* 1992. Т. 139. С. 535-560). В соответствии с этой теорией отбор пластовых флюидов из продуктивного пласта снижает поровое давление и вызывает объемное сжатие пород коллектора, что приводит к образованию напряжений. Прямой связи между снижением порового давления и сжатием пород коллектора не существует. Упругие напряжения в пористой среде пространственно ограничиваются тонким слоем земной коры, находящимся около продуктивного пласта.

Известны примеры крупных землетрясений ($M \geq 6.0$), происходящих на расстоянии десятков километров от некоторых месторождений, например, таких как месторождение Газли (McGarr A. On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1991. Т. 81. №. 3. С. 948-970.; Grasso J.R. *Mechanics of Seismic*

Instabilities induced by the Recovery of Hydrocarbons // *Pure Appl. Geophys.* 1992. Т. 139. С. 507-534). Ряд исследователей связывают подобного рода сейсмические события с процессом регионального изостатического выравнивания, связанного с разгрузкой земной коры в результате добычи углеводородов. Как показал Сигал (Segall P., Fitzgerald S. D. A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs // *Tectonophysics.* 1998. Т. 289. №. 1. С. 117-128), эта теория или модель массовых изменений состояния земной коры носит лишь чисто гипотетический характер, даже при условиях, когда упругие напряжения в пористой среде в значительной степени превышают те, которые обусловлены массовыми изменениями в земной коре. В целом упругие напряжения в пористой среде очень малы, находятся на уровне нескольких бар и возможно много меньшем (McGarr A. On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1991. Т. 81. №. 3. С. 948-970.; Segall P. Earthquakes triggered by fluid extraction // *Geology.* 1989. Т. 17. №. 10. С. 942-946.). Упругая деформация, высвобождаемая в процессе индуцированных землетрясений является деформацией, которая могла бы высвободиться в ближайшем будущем в результате землетрясения естественного тектонического происхождения (в соответствии с сейсмическим циклом). К сожалению, напряженное состояние активных разломов в естественном залегании трудно определить, поэтому предсказание масштабов флуктуации напряжений, требуемых для индуцирования сильного землетрясения, не представляется возможным.

Оседание поверхности Земли в результате уплотнения породы коллектора наблюдалось на нескольких месторождениях, находящихся в разработке в течение ряда лет. Изменение напряжения, вызывающего деформацию грунта, эквивалентно эффективному напряжению, равному по величине и противоположному по направлению изменению давления флюида в пористом пространстве, а также действующему равномерно во всех направлениях (Lee M. K. W., Finn W. D. L. DESRA-2: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential. Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 1978). Если порода подвержена воздействию внутреннего давления флюидов, сжимающие напряжения будут уравниваться гидростатическим давлением жидкости. Механизм деформации пласта является функцией эффективных напряжений, а колебания грунта, происходящие в результате отбора пластового флюида, вызываются изменениями эффективных напряжений (Lee M.K.W., Finn W.D.L. DESRA-2: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential. Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 1978). Несцементированные флюидосодержащие отложения обладают высокой чувствительностью к изменениям эффективных напряжений. Незначительные изменения

напряжений могут вызвать необратимое массивированное уплотнение пород коллектора (Lofgren В. Е. Hydraulic stresses cause ground movement and fissures, Picacho, Arizona // *Geol Soc Am Abstr Programs*. 1978. Т. 10. №. 3. С. 113.).

Изменения напряжений, вызванные отбором пластового флюида, незначительны как по сравнению с тектоническими и литостатическими напряжениями на гипоцентральных глубинах, так и по сравнению с устойчивостью грунта к разрушению (Simpson D. W. Triggered earthquakes // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1986. – Т. 14. – С. 21). Напряжения, вызванные различными связанными с отбором пластовых флюидов механизмами, невелики, значительно меньше 1.0 Мпа (10 бар) (Grasso J.R. Mechanics of Seismic Instabilities induced by the Recovery of Hydrocarbons // *Pure Appl. Geophys.* 1992. Т. 139. С. 507-534). Такие небольшие флуктуации напряжений могут вызвать сейсмическую активность только при условии, если поровое давление близко к литостатическому (Segall P. [et al.] Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France // *J. Geophys. Res.* 1994. Т. 99. С. 15423-15438). Сами по себе флуктуации напряжений недостаточно велики для разрыва пород. Ожидается, что концентрации местных напряжений, которые могут возникнуть в результате резких перепадов порового давления или других факторов, быстро снизятся с удалением от коллектора (Segall P. [et al.] Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France // *J. Geophys. Res.* 1994. Т. 99. С. 15423-15438).

Сейсмологические исследования и мониторинг коллекторов, потенциально способных возбудить сейсмическую активность в результате отбора пластовой продукции, не показали никакой корреляции между сейсмической активностью и изменением темпов добычи углеводородов (Doser D.I. [et al.] Seismicity in the War-Wink gas field, Delaware Basin, west Texas, and its relationship to petroleum production // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1991. Т. 81. №. 3. С. 971-986, 1992; Baker M. R., Doser D. I., Luo M. Geologic and oil field controls on earthquakes in the War-Wink Field, Delaware Basin // *Bulletin-West Texas Geol. Soc.* 1991. Т. 31. №. 1. С. 5-12.; Rutledge J. T. [et al.] Reservoir microseismicity at the Ekofisk oil field // *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. – Society of Petroleum Engineers, 1994.). Противоположный эффект наблюдается в некоторых регионах при осуществлении обратной закачки в пласт пластовой воды на большие глубины, когда при изменении интенсивности закачки были зарегистрированы изменения в частоте проявления сейсмической активности (Nicholson C., Wesson R. L. Triggered earthquakes and deep well activities // *Pure and Applied Geophysics*. 1992. Т. 139. №. 3-4. С. 561-578).

Отсутствие корреляции между темпами добычи углеводородной продукции и периодичностью землетрясений отражает важное значение накопленной эффективной нагрузки, вызывающей напряжения, а также флуктуации напряжений, сопровождающих снижение

пластового давления в коллекторах, характеризующихся способностью к возбуждению сейсмической активности при их разработке (Rutledge J. T. et al. Reservoir microseismicity at the Ekofisk oil field // *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. – Society of Petroleum Engineers, 1994.). Значение вышеуказанных факторов, регулирующих механизм наведения сейсмической активности при добыче, подтверждается результатами исследований, показывающих доминирующую роль упругих напряжений в пористой среде в сравнении с другими предложенными механизмами формирования напряжений, имеющими место в результате отбора углеводородной продукции (Segall P. Earthquakes triggered by fluid extraction // *Geology*. – 1989. – Т. 17. – №. 10. – С. 942-946; Segall P. Induced stresses due to fluid extraction from axisymmetric reservoirs // *Pure Appl. Geophys.* 1992. Т. 139. С. 535-560; Segall P., Grasso J.R., Mossop A. Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France // *J. Geophys. Res.* 1994. Т. 99. С. 15423-15438).

Современное состояние вопросов, связанных с изучением наведенной сейсмичности, а также разработкой общих расчетных моделей возникновения землетрясений и их повторяемости в зависимости от напряжений в среде, приводит к следующим выводам.

1. Искусственно вызванные землетрясения в основном происходят при закачке жидкостей в пласты под давлением (например, при обратной закачке в скважину пластовых вод или при применении вторичных методов увеличения нефтеотдачи) (Raleigh C.B., Healy J.H., Bredehoeft J.D. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado // *Science*. 1976. Т. 191. №. 4233. – С. 1230-1237; Grasso, et al., 1989; Yerkes R. F., Castle R. O. Seismicity and faulting attributable to fluid extraction // *Engineering Geology*. 1976. Т. 10. №. 2. С. 151-167). В настоящее время общепринято, что такого рода землетрясения обусловлены триггерным воздействием роста порового давления на существующие в окрестности резервуара зоны активных разломов. Это воздействие заключается в снижении эффективного нормального напряжения, действующего перпендикулярно плоскостям разломов и, как следствие, в уменьшении кулоновского трения на них. Поскольку поровые давления не изменяют сдвиговых напряжений, то считается, что скольжение по разломам обусловлено существующим уровнем тектонических напряжений. Поэтому ясно, что анализ проблемы состоит как в конкретном расчете распределения полей местных напряжений и изменении регионального поля напряжений, так и в анализе общей тектонической и сейсмологической ситуации в районе. Интенсивность возможных искусственно вызванных землетрясений не может быть выше интенсивности землетрясений естественного, не связанного с добычей, происхождения.

2. При извлечении флюидов искусственно вызванные землетрясения значительно менее вероятны. Механическая ситуация в этом случае другая и обусловлена уменьшением порового

давления на очень большую величину, в десятки и сотни МПа. Поровое давление в проницаемых породах резервуара уменьшается во много меньше, чем в окружающих малопроницаемых породах. Это приводит к «рассогласованию» деформаций, когда породы резервуары сжимаются намного больше, чем окружающие, что и генерирует напряжения, способные привести к сбросообразованию в окружающих коллектор структурах. Теоретически допустимо, что массовое истощение углеводородных запасов коллектора может изменить литостатический градиент давления и результирующие напряжения сдвига, вызывая смещение по глубоким разломам земной коры, которые в своем естественном состоянии близки к разрушению. Однако, как и в случае закачки флюидов, изменения напряжений в результате добычи незначительны по сравнению с характерными для естественных землетрясений перепадами напряжений и сами по себе недостаточны для инициирования процесса смещения сбросов, если последние уже не нагружены до уровня, при котором они были бы очень близки к самопроизвольному разрушению. Для таких искусственно вызванных землетрясений характерно следующее: 1) как правило, они происходят спустя многие годы или десятилетия после разработки месторождения, запасы которого истощаются настолько, что естественное начальное давление в пласте значительно снижается (на 50% или больше); 2) значительное снижение естественного пластового давления вызывает уплотнение обычно рыхлых или слабосцементированных структур, что приводит к оседанию поверхности Земли и возбуждению микросейсмической активности на малых глубинах; 3) интенсивность отбора углеводородов не оказывает явного воздействия на возможную сейсмическую активность.

1.2. Обзор сейсмичности, связанной с извлечением углеводородов и закачкой жидкости

В настоящем разделе рассматриваются случаи, когда промышленное освоение месторождений нефти и газа привело к ощутимому изменению сейсмического режима и возбуждению сильных землетрясений.

Месторождение нефти Экофиск (Норвегия). 7 мая 2001 г. вблизи нефтяного месторождения Экофиск произошло умеренное землетрясение, магнитуда которого составила $M_w=4.4$ (Рисунок 1). Определение параметров очага выполнено в (Ottemöller L. [et al.]. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. Geophys. Res. 2005. Т. 110. № В10301. С. 1-15.). Топографическая выпуклость в морском дне, выявленная по данным батиметрии, и избыточное давление в верхних грунтовых отложениях в северо-восточной части месторождения, обнаруженное только после этого события, были вызваны нагнетанием воды, которое началось в 1999 г. Сделан вывод, что очаг землетрясения расположен в осадочном чехле на глубине чуть менее 3 км. Первоначально, это представлялось маловероятным из-за очень низкой прочности глинистых, богатых сланцевых и глиняных пород. Однако, сейсмическое

событие могло быть вызвано изменением напряженно-деформированного состояния геосреды вследствие нагнетания воды. Событие, возможно, инициировалось на северном крыле месторождения, у инжекторной скважины. Тензор сейсмического момента имеет довольно “чистую” компоненту двойной пары сил. Предполагается, что разрыв произошел по субгоризонтальной плоскости. Сброшенное напряжение было аномально низким, что, по всей видимости, соответствует низкой прочности пород в верхнекорковых отложениях (осадочном чехле).

Месторождение находится в Северном море, приурочено к удлиненной антиклинали с основной осью складки вытянутой приблизительно в направлении север-юг, нефтесодержащий пласт расположен на глубине около 3 км от поверхности моря и состоит из двух трещиноватых слоев мела, разделенных слоем глины, кремнезема и кремнистого мела. Нефтяная залежь на месторождении Экофиск верхнемелового возраста имеет мощность более 300 м при общей площади около 50 км² (Teufel L. W., Rhett D. W., Farrell H. E. Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the Ekofisk field, North Sea, // Proc. U. S. Rock Mechanics Symp. 1991. №32. С. 63-72).

Месторождение разрабатывается с 1971 г. С начала 1980 г. отмечается опускание морского дна со скоростью около 0.4 м/год (Ottemöller L. [et al.]. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. Geophys. Res. 2005. Т. 110. № B10301. С. 1-15.). К 1984 г. было обнаружено проседание поверхности дна на 3-4 метра (Maury V. [et al.]. Mecanique des roches appliquee aux problemes d'exploration et de production petrolieres. // Societe Nationale Elf Aquitaine (production) boussens. 1993), что привело к сокращению расстояния между поверхностью моря и эксплуатационной платформой. В 1987 г. на месторождении Экофиск началось полное заводнение, однако опускание дна продолжалось и к 1994 г. составило около 6 м (Schwall G. H, Denney C.A. Subsidence induced casing deformation mechanisms in the Ekofisk field. // Society of Petroleum Engineers, Inc. SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference held in Delft, The Netherlands. 1994), к 1999 г. оно достигло 7.8 м (Sylte J. E., Thomas L. K., Rhett D. W. Water Induced Compaction in the Ekofisk Field. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston. 1999), а к августу 2002 возросло до 8.26 м (Ottemöller L. [et al.]. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. Geophys. Res. 2005. Т. 110. № B10301. С. 1-15.). В последнее время темп опускания значительно снизился по сравнению с предшествующим временем и составляет приблизительно 0.1-0.15 м/год. Проседание дна моря привело к деформации и повреждениям уложенных на дне труб. За несколько лет было выполнено аномально высокое число повторных ремонтных работ на эксплуатационной скважине, направленных на ликвидацию разрывов в зонах цементирования, сплющивания или разрушения обсадных труб и даже эксплуатационной колонны.

Наблюдаемое с 1971 г. на месторождении Экофиск проседание в разных режимах эксплуатации (с обводнением и без него) свидетельствует о том, что это проседание связано как с уплотнением среды в пределах резервуара, так и со сдвигом по разломам. Сброс по разломам усиливается при истощении месторождения; проскальзывание на активных разломах может способствовать уплотнению резервуара, вызывая проседание морского дна (Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.).

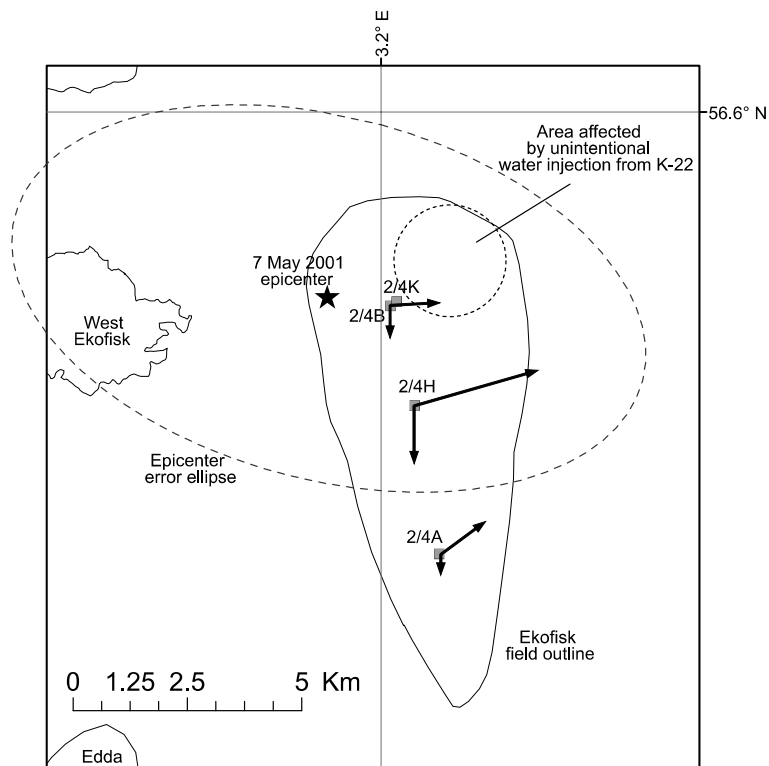


Рисунок 1. Расположение эпицентра землетрясения, контура месторождения Экофиск, а также направления косейсмических горизонтальных и вертикальных смещений (на рисунке в направлении уменьшения широты). Горизонтальное смещение для платформы 2/4H соответствует 16 см. Все вектора смещений даны в одном масштабе. Рисунок взят из работы (Ottemöller L. [et al.]. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. Geophys. Res. 2005. Т. 110. № В10301. С. 1-15).

Нефтегазовое месторождение Лак (Франция). Месторождение Лак расположено в пределах антиклинарной структуры в предгорьях Французских Пиренеев. Оно представлено небольшой нефтяной залежью, находящейся в отложениях верхнего мела на глубине 600-700 м и гидродинамически связанной с обширным водоносным горизонтом мощностью до 2500 м, и крупной газовой залежью (мощностью до 400 м), расположенной на глубине 3500 м в доломитах и трещиноватых известняках. Разработка нефтяной залежи начата в 1950 г., газовой – в 1959 г.

(Grasso J.R., Feignier B. Geomechanical behavior and structural evolution induced by a de-pletion. A case study of a gas field. // Rockbursts and seismicity in mines. Balkema. 1990. С. 53-60). Начальные запасы месторождения составляют около 4 млн. тонн.

К 1990 г. было добыто около 1.8×10^{11} м³ газа. Средняя скорость добычи с 1961 по 1981 гг. составляла 7.5×10^9 м³ в год (Grasso J.R., Feignier B. Geomechanical behavior and structural evolution induced by a de-pletion. A case study of a gas field. // Rockbursts and seismicity in mines. Balkema. 1990. С. 53-60; Grasso J.R. Mechanics of Seismic Instabilities induced by the Recovery of Hydrocarbons // Pure Appl. Geophys. 1992. № 139. С. 507-534.).

Сейсмичность проявилась с 1968-1969 гг., спустя десять лет после начала эксплуатации залежи газа. 24 ноября 1969 г. был зарегистрирован первый толчок, в январе и декабре 1972 г – два других. Магнитуды этих сейсмических событий составили от 3 до 4, очаги располагались непосредственно над газовой залежью (Мори В., Грассо Ж. Р., Витличжер Ж. Газовое месторождение Лак (Франция): контроль за вызванным проседанием и влияние сейсмоактивности на газодобычу. // Механика горных пород

Эпицентры сейсмических событий, обусловленных разработкой газового месторождения Лак, расположены в первоначально асейсмичном районе, удаленном на 40 км к северу от активной зоны Северо-Пиренейского разлома (Рисунок 2), ограничивающего региональную Пиренейскую сейсмоактивную область с севера. До разработки месторождения этот район являлся сейсмически неактивным.

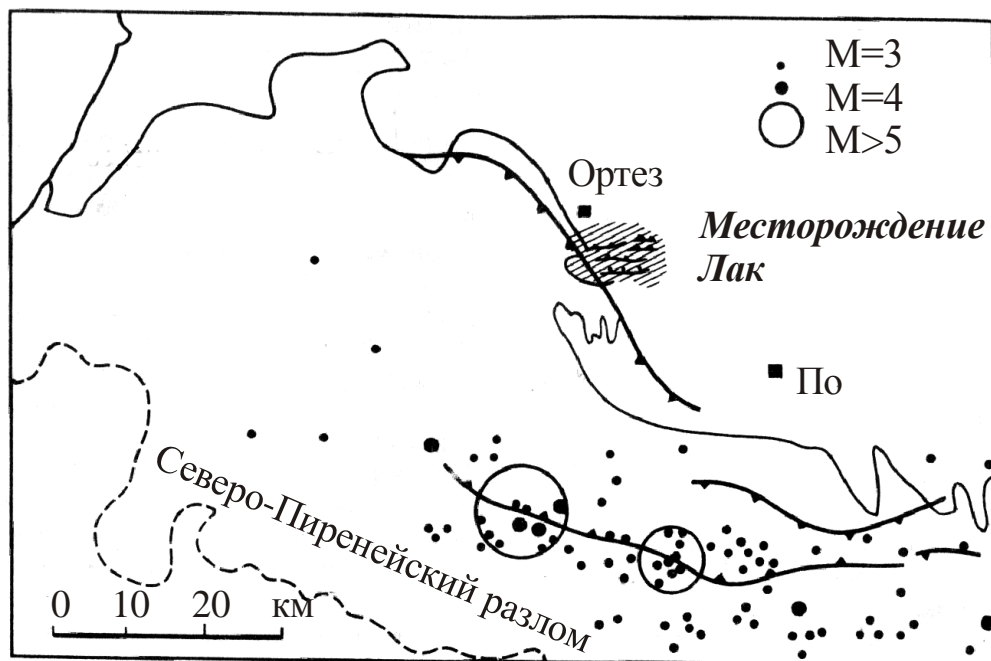


Рисунок 2. Сейсмичность района газового месторождения Лак (Мори В., Грассо Ж. Р., Витличжер Ж. Газовое месторождение Лак (Франция): контроль за вызванным проседанием и

влияние сейсмоактивности на газодобычу. // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. М.: Мир, 1994. 416 с.).

После 1969 г. была создана специальная сейсмическая сеть, которая до 2002 г. зарегистрировала более 1000 землетрясений с магнитудами от 1 до 4.4 (Bardainne T., Senechal G., Grasso J.R. Study of a gas field fracturation based on induced seismicity in 3D seismic data. // Geophysical Research Abstracts, European Geophysical Society. 2003. № 5. С. 06453.). Более 90% зарегистрированных событий имеют эпицентры внутри контура нефтегазоносности, причем они сосредоточены преимущественно в восточной части месторождения. Самое сильное сейсмическое событие произошло 2 мая 1981 г. и имело магнитуду $M=4.4$, после чего наблюдалось постепенное снижение активности.

В работе (Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.) отмечена четкая корреляция проседания поверхности и сейсмичности с падением порового давления в коллекторе свидетельствует о преобладающем влиянии истощения газового резервуара на напряженное состояние коллектора. На основании этого сделан вывод, что уменьшение порового давления газа в коллекторе (до 7 МПа в 2002 г.) приводит к увеличению напряжений в его скелете и, таким образом, к нарушению равновесия; это проявляется в проседании поверхности и появлении сейсмичности в пределах контура газовой залежи. Путем непосредственных измерений установлено, что падение давления практически одинаково для всей залежи. Поэтому наличие зон с разной сейсмической активностью в пределах месторождения определяется, главным образом, геологическими и структурными неоднородностями.

Газлийское газовое месторождение (Узбекистан). 8 апреля 1976 г. в 20 км от газового комплекса Газли произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 6.8, интенсивность в эпицентре 8-9 баллов; 17 мая 1976 г. в 27 км западнее эпицентра первого землетрясения произошло второе катастрофическое землетрясение с $M=7.3$, интенсивность в эпицентре 9-10 баллов; наконец, 20 марта 1984 г. в 15 км к западу от эпицентра второго землетрясения – третье, с магнитудой 7.2 (Рисунок 3). Глубина гипоцентров составила 25-30 км.

Газовое месторождение Газли расположено в Средней Азии в 100 км северо-западнее г. Бухары, Узбекистан. В строении месторождения принимают участие отложения юрской, меловой, палеогеновой и неогеновой систем, перекрывающие палеозойский складчатый фундамент. Общая мощность осадочного покрова достигает 1200-1600 м. Месторождение контролируется антиклинальной складкой асимметричного строения размером 38×12 км.

На месторождении выявлено десять газовых и газоконденсатных залежей и одна нефтяная в отложениях нижнего и верхнего мела. Мощность газоносных пластов 80-120 м, глубина

залегания от 800 до 1350 м. Продуктивные горизонты представлены в основном песчаниками и алевролитами с прослоями глин.

Месторождение открыто в 1956 г., разработка начата в 1962 г. В ходе работ в пласты закачано около 600 млн. куб. м воды (по состоянию на 1976 г.), что составляет примерно 1 млн. тонн на км². Зарегистрировано опускание земной поверхности, которое с 1964 по 1968 г. происходило со скоростью 10.0 мм/год, а с 1968 по 1974 г. – со скоростью 19.2 мм/год. В работе (Пискулин В.А., Райзман А.П. О геодезических исследованиях деформаций земной поверхности в эпицентральных зонах Газлийских землетрясений 1976 - 1984 г.г. // 7-й Международный симпозиум по современным движениям земной коры, Таллинн. 1986) показано, что изменению внутрипластового давления на 1 атм. соответствует опускание поверхности в центральной части месторождения на 2 мм.

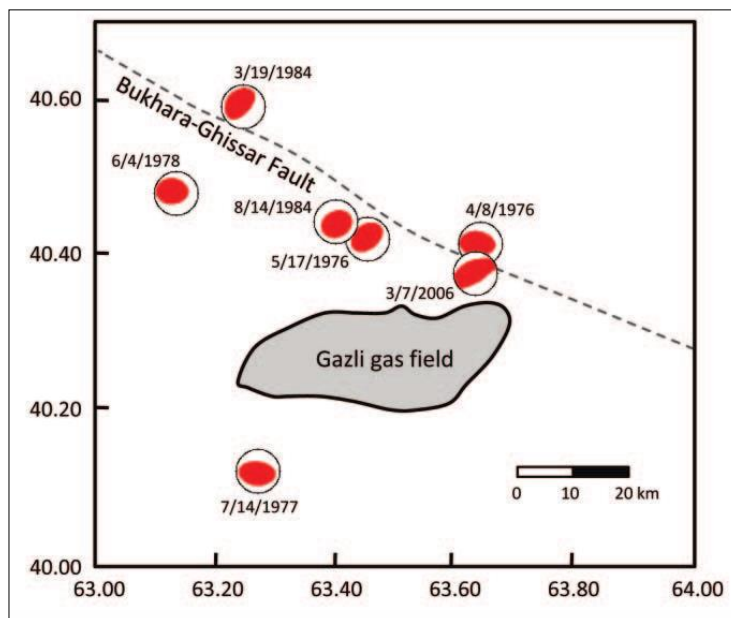


Рисунок 3. Положение тектонического разлома, контуров Газлийского месторождения и фокальных механизмов сильнейших газлийских землетрясений (Suckale J. Induced seismicity in hydrocarbon fields // *Advances in Geophysics*. 2009. № 51. С. 55-106)

Мощность земной коры в пределах зоны Газлийских землетрясений составляет 32 км. Четкой связи Газлийских землетрясений с каким-либо из активно развивающихся структурных элементов не устанавливается. По мнению ряда авторов, разрыв, приведший к землетрясениям, является новообразованным (Штейнберг В.В., Грайзер В.М., Иванова Т.Г. Землетрясение в Газли 17.V.1976 г. // *Изв. АН СССР. Физ. Земли*. 1980. №3). В работе (Турунтаев С.Б., Горбунова И.В. О характере множественного разрушения в очаговой области Газлийских землетрясений // *Изв. АН СССР, Физ. Земли*. 1989. N 6. С. 72-78; Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.) анализируется тонкая

структура облака афтершоков, наличие которой также свидетельствует о начальной фазе активизации тектонических движений. Механизмы очагов и тонкая структура облака афтершоков согласуются с региональным полем напряжений и ориентацией систем разломов.

После землетрясений 1976 г. и 1984 г. были проведены повторные геодезические наблюдения. В области досейсмического опускания земной поверхности после землетрясений 1976 г. отмечено еще большее опускание (до 230 ± 7.6 мм) (Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.). В непосредственной близости от эпицентров землетрясений зарегистрировано поднятие поверхности: вблизи эпицентра 8 апреля 1976г. – до 830 мм, 17 мая 1976г. – до 763 мм, 20 марта 1984 г. – до 751 мм. Были зарегистрированы также горизонтальные смещения до 1 м в сторону от эпицентра.

Все вышеуказанное, а также факты (Акрамходжаев А.М., Ситдииков Б.Б., Бегметов Э.Ю. О возбужденном характере Газлийских землетрясений в Узбекистане // Узбекский геол. журнал. 1984. № 4. С. 17-19), свидетельствует об иницировании Газлийских землетрясений процессами разработки месторождения. По измеренным остаточным деформациям на поверхности был проведен расчет дополнительных эффективных напряжений, величина которых составила 6-14 МПа, что сопоставимо с напряжениями, способными вызвать землетрясения.

В рассматриваемом случае эксплуатация месторождения газа оказала триггерное воздействие на сейсмичность. Высокий уровень тектонических напряжений, характерный для окраин молодых платформ вообще и для Туранской плиты в частности, обусловил накопление значительной энергии механической деформации. Эксплуатация месторождения, которая проводилась без учета возможности влияния на сейсмо-деформационный режим региона, дала толчок для высвобождения накопленной энергии в виде мощных сейсмических событий. Учет естественных деформационных процессов при выборе режима и технологических приемов эксплуатации месторождения позволил бы избежать возникновения катастрофических явлений (Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.).

Таким образом, длительная, более 14 лет, безконтрольная разработка месторождения на глубине 0.8-1.5 км изменила флюидодинамический режим региона, что привело к глобальной перестройке напряженно-деформированного состояния, в результате чего на глубине 25-30 км возникли избыточные напряжения, приведшие в возникновению катастрофического техногенного землетрясения.

Нефтегорское землетрясение 1995 г. 27 мая 1995 г. в 13 ч 03 мин по Гринвичскому времени на севере острова Сахалин произошло разрушительное землетрясение, магнитуда

которого по поверхностным волнам составила $MLH=7.2$, значение моментной магнитуды $M_w=7.1$ (HRVD). За прошедшие 100 лет на северо-востоке о. Сахалин землетрясение такой величины произошло впервые. Оно вызвало сотрясения на территории Северного, Среднего и частично Южного Сахалина, а также на востоке центральной части Хабаровского края. Максимальный наблюдаемый макросейсмический эффект 8-9 баллов (по шкале MSK-64) отмечен в п. Нефтегорск, который был полностью разрушен, более 2000 его жителей погибли. Расчетная площадь 7-бальных сотрясений составила около 2500 км^2 (Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин / отв. ред. д-р геол.-мин. наук А.И. Кожурин. – Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2014, 252 с.) (Рисунок 4).

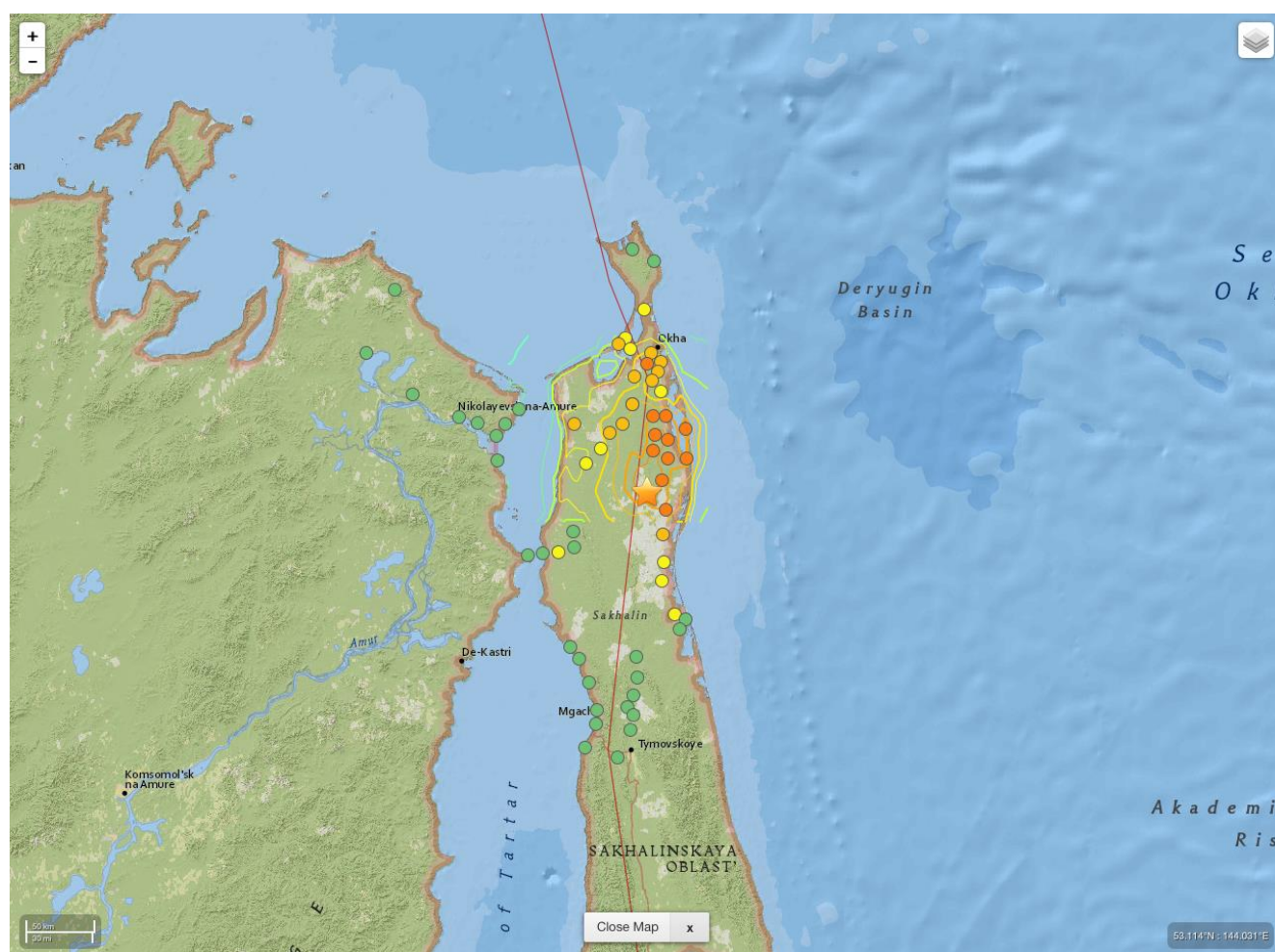


Рисунок 4. Карта интенсивности землетрясения 27 мая 1995 г. $M_w=7.1$ (USGS Earthquake Hazards Program: электронный ресурс²) составленная на основе установленных макросейсмических проявлений (Ivashchenko A. I. et al. The Neftegorsk, Sakhalin Island, earthquake of 27 May 1995 //Island Arc. 1997. Т. 6. №. 3. С. 288-302).

² http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0006y50#general_summary

Во время землетрясения 27(28) мая 1995 г. разрывными деформациями был нарушен блок и земная поверхность между Пильтун-Эхабинским и Гыргыланьи-Дагинским разломами. Простираение активного разлома в основном север-северо-восточное, лишь на некоторых непротяженных участках оно становится практически строго меридиональным, почти смыкается с Эхабино-Пильтунским разломом (восточнее Нефтегорска), а на юго-западе сливается с линией Гыргыланьи-Дагинского разлома. Плоскость разрыва во многих случаях имеет крутые (около 70°) падения на северо-запад, однако в ряде мест она приобретает пропелеобразную форму, в связи с чем появляются обратные ее падения. Морфологически зона скалывания, фиксирующая разлом, большей частью выражена в виде эшолонированных сколов Риделя. Довольно часто встречаются структуры типа «Ридель в риделе» (Ridel within Ridel), складки и скручивание дерна, явления надвигообразования. Предварительные результаты полевых исследований разлома, выполненные Кожуриным А.И., Рогожиным Е.А., Стрельцовым М.И., Симамото Т., Судзуки Я., Ватанабе М. и др., позволили заключить, что рассматриваемый разлом не является новообразованием. Он был активен в недавнем геологическом прошлом, что устанавливается по наличию вдоль него палеосейсмодислокаций, смещений форм рельефа (Иващенко А.И., Кузнецов Д.П., Ким Чун Ун [и др.] Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. на Сахалине // Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. : инф. – аналит. бюл. ФССНиЗП, Экстренный вып., октябрь, 1995. – М. : Изд-во МЧС России и РАН, 1995. – С. 48-79.), значительно превосходящих по величине отмеченную выше сдвиговую компоненту смещения. Образовавшийся разлом пространственно совпадает с установленным ранее при геологосъемочных и поисковых работах Верхне-Пильтунским разломом. Разлом начинается в 3-4 км южнее Нефтегорска и протягивается далее на юг примерно на 35 км. Средние смещения – 3.8 м правый сдвиг, 0.3 м вертикальный (западное крыло поднято). По данным (Семенов Р.М., Павленов В.А. Некоторые макросейсмические последствия Нефтегорского землетрясения 1995 г. // Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. : инф. – аналит. бюл. ФССНиЗП, Экстренный вып., октябрь, 1995. – М. : Изд-во МЧС России и РАН, 1995. – С. 76-93.) – на 1.2 м и одновременно сдвинулось на северо-восток на 1.5 м соответственно. Южнее и параллельно ему образовались еще три разлома меньшей протяженности.

Очаги афтершоков Нефтегорского землетрясения 1995 г. располагались на глубине 10-15 км (Рисунок 5). Регион Нефтегорского месторождения характеризуется сложным геолого-тектоническим строением, наличием многочисленных пересекающихся разломов. Более того Нефтегорскому землетрясению предшествовала серия землетрясений в 1994-1995 гг. в окрестности будущей очаговой зоны (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.) (Таблица 1). Однако за 10 лет до этого в очаговой зоне землетрясения и обширной прилегающей

территории не наблюдались сейсмические события с $MLH \geq 5$.

Год	Месяц	День	Час	Минута	Секунда	Широта	Долгота	Глубина	М
1994	05	06	04	35	54.2	50.380	142.180	6.0	4.0
1994	05	31	22	09	01.5	52.440	141.730	15.0	4.4
1994	12	13	13	11	14.5	53.960	141.700	16.0	5.1
1994	12	13	13	46	49.5	54.010	141.680	16.0	4.2
1994	12	14	11	31	38.3	54.060	141.780	15.0	4.0
1995	04	17	17	56	25.3	54.100	142.700	15.0	4.6

Таблица 1. Землетрясения с $M \geq 4$ 1994-1995 гг. в окрестности очаговой зоны Нефтегорского землетрясения (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.).

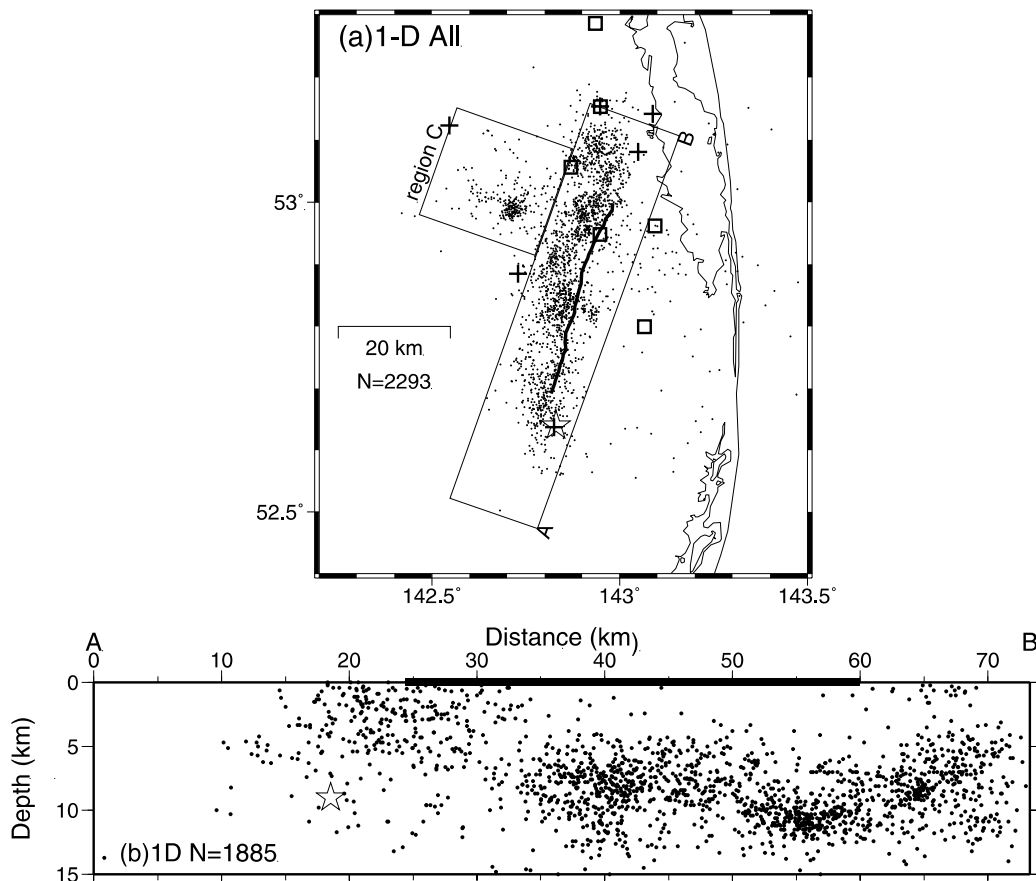


Рисунок 5. Пространственное распределение очагов афтершоков Нефтегорского землетрясения 1995 г. по координатам гипоцентра. Рисунок взят из работы (Katsumata K., Kasahara M., Ichiyanagi M. et al. The 27 May 1995 MS 7.6 Northern Sakhalin earthquake: an earthquake on an

uncertain plate boundary // Bull. Seis. Soc. Am. 2004. Т. 94. № 1. С. 117-130).

Техногенное воздействие на массив характеризуется длительной и непрерывной добычей нефти, начиная с 40-х годов прошлого столетия. Извлечение нефти в объеме примерно 1-2 млн. тонн в год производится с глубины 1-3 км, где расположено от 7 до 14 продуктивных слоев (Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.). Такая продолжительная нефтедобыча и извлечение свыше 100 млн. тонн нефти привели к истощению многих участков месторождения, снижению в них пластового давления и, возможно, даже к образованию пустот, что в конечном счете сопровождалось перераспределением пластового давления и соответствующими изменениями напряженно-деформированного состояния в верхних слоях земной коры. Поэтому некоторые специалисты высказали соображения о возможном триггерном влиянии активной нефтедобычи на возникновение катастрофического Нефтегорского землетрясения (Николаев А.В. О возможном влиянии разработки нефти на параметры Нефтегорского землетрясения // В сб. ФССН МЧС России. 1995.). Эти соображения были подкреплены анализом процессов декомпрессии, развивающихся в условиях понижения пластового давления и сопровождающихся усилением сейсмических эффектов (Кондратьев В.Н., Турунтаев С.Б. Лабораторное моделирование формирования и разрушения арочных конструкций над областями декомпрессии, возникающими при нефтегазодобыче // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1997, № 5, с. 32–41.).

Пильтунское землетрясение 2005 г. 12 июня 2005 г. на северо-востоке о. Сахалин восточнее месторождения нефти и газа Пильтун-Астохское (Рисунок 6), разрабатываемого с 1999 г., на расстоянии около 20-35 км от него произошло коровое землетрясение с моментной магнитудой $M_w=5.6$. Так как ближайший населенный пункт, в котором отмечены максимальные сотрясения, – п. Пильтун, то предложено данное событие называть Пильтунским землетрясением 2005 г. Очаг данного землетрясения располагается в 10-20 км восточнее Восточно-Сахалинского глубинного разлома.

Восточно-Сахалинский глубинный разлом выделяется как субмеридиональная система разломов, преимущественно северо-северо-западной ориентации, протягивающаяся вдоль охотоморского побережья Сахалина и уходящая далее на юго-восток в сторону Южно-Охотской глубоководной впадины, и характеризуется относительно слабой сейсмичностью за период инструментальных наблюдений. Несколько землетрясений, близких по магнитуде к $M\sim 5.5$ (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.), ранее уже были зарегистрированы на северо-восточном шельфе (восточнее от п-ва Шмидта), их возникновение обычно связывали с

современной тектонической активностью западного борта впадины Дерюгина. Пильтунское землетрясение 2005 г. представляет особый интерес, т.к. оно произошло значительно южнее упомянутых событий и пока является самым сильным в этой шельфовой зоне острова за всю историю сейсмологических наблюдений (с 1905 г. по настоящее время).

Необычный характер такой сейсмической активизации интерпретируется некоторыми сейсмологами (Тихонов И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 59-63.) как проявление наведенной сейсмичности, спровоцированной в результате промышленной разработки нефтегазоконденсатного месторождения Пильтун-Астохское. В пользу этого приводятся следующие аргументы:

1. Близость очагов землетрясений к контуру месторождений.
2. Увеличение уровня сейсмической активности ($M \geq 4.0$) в 2005-2009 гг. в непосредственной близости от месторождения.
3. Увеличение максимальной магнитуды регистрируемых землетрясений после начала производственной деятельности.
4. Уменьшение угла наклона кумулятивного графика повторяемости Гутенберга-Рихтера.

В 1991 г. консорциум нефтяных и инвестиционных компаний («Сахалин-2») выиграл тендер на право разработки нефтяного Пильтун-Астохского и газового Лунского месторождений (Сахалин 2: Электронный ресурс³). Через пять лет начался практический этап работы на шельфе. Ключевым решением, отличным от традиционного освоения месторождений суши, оказался принцип поэтапного освоения. Компанией «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани, Лтд.», оператором проекта «Сахалин-2», было принято решение на разработку наиболее подготовленного нефтяного участка Пильтун-Астохского месторождения (Рисунок 6). За три года с момента начала проекта (1996 г.) была модифицирована для добычи нефти и установлена в море буровая платформа «Моликпак». В 1999 г. началась сезонная, в межледовый период, добыча нефти. В 2006 г. начался этап установки платформ, ввода и отладки всех объектов, а затем – круглогодичная добыча нефти и газа на Пильтун-Астохском месторождении. Извлекаемые запасы нефтегазоконденсатного месторождения составляют около 109 млн. тонн.

До начала освоения залежи область в радиусе 25 км от нефедобывающей платформы «Моликпак» имела низкий уровень фоновой сейсмичности (Тихонов И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного

³ <https://ru.wikipedia.org/wiki/Сахалин-2>

месторождения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 59-63.). За весь период инструментальных наблюдений с 1930 г. до начала разработки месторождения здесь не было зарегистрировано землетрясений с магнитудой $M_LH > 5$. По данным из (Тихонов И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 59-63.) за 10 лет с момента начала добычи в районе платформы произошли 5 сильных землетрясений на глубине 10-15 км (Рисунок 6): 12 июня 2005 г. ($M_LH=5.7$), 5 сентября 2005 г. ($M_LH=4.7$), 22 августа 2007 г. ($M_LH=5.0$), 17 ноября 2007 г. ($M_LH=4.2$) и 22 август 2009 г. ($M_LH=4.8$).

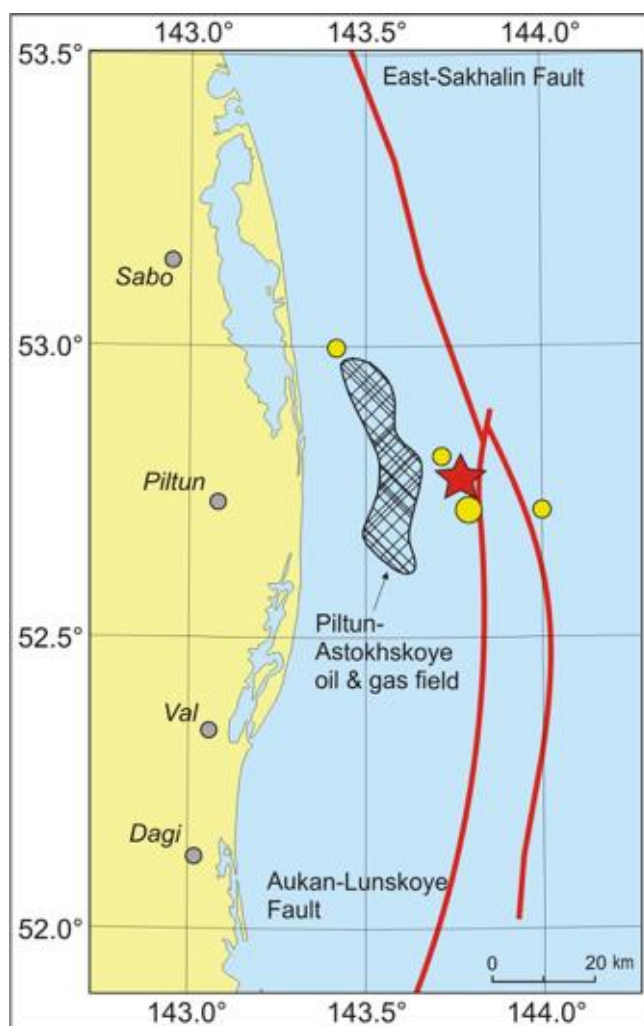


Рисунок 6. Контур Пильтун-Астохского нефтегазового месторождения и эпицентры землетрясений в период с 12 июня 2005 по 22 август 2009 г. Звездой отмечено событие 12 июня 2005 г. $M_w=5.6$. (Тихонов И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения // Вестник ДВО РАН. 2010. № 3. С. 59-63.)

Высказываются соображения (Тихонов И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 59-63.) о необычной для естественной сейсмичности регулярности их появления и аномально высокая повторяемость. Эпицентры указанных землетрясений образуют плотный кластер около юго-восточной части контура Пильтун-Астохского месторождения. Его продуктивный пласт выявлен на глубинах 1.2-2.5 км, в то время как гипоцентры землетрясений расположены либо вблизи границы Конрада, залегающей в этом районе на глубинах 14-16 км, либо немного выше ее. При такой глубине очагов наведенная сейсмичность, по мнению некоторых сейсмологов, носит триггерный характер.

С конца 2006 г. на севере о. Сахалин стали проводиться детальные сейсмологические наблюдения, цель которых – изучение динамики сейсмического режима и своевременное выявление сейсмической активизации, которая может наступить в результате многолетней эксплуатации нефтегазовых месторождений в северо-восточной шельфовой зоне острова. К настоящему времени накоплен и обработан огромный архив инструментальных данных, и подготовлен рабочий вариант каталога землетрясений, что позволило детально проанализировать современную сейсмичность Северного Сахалина, в том числе и в районе нефтегазовых месторождений. В диссертации проанализированы все доступные данные Пильтунского землетрясения 2005 г. и представлены его очаговые параметры и фокальный механизм. В совокупности, это позволило критически пересмотреть основные результаты, касающиеся условий и возможных причин возникновения Пильтунского землетрясения 2005 г.

1.3. Модели триггерной/индуцированной сейсмичности, возникающей при промышленном освоении месторождений углеводородов

В мировой горнопромышленной практике выявлены случаи (Grasso J.R. Mechanics of Seismic Instabilities induced by the Recovery of Hydrocarbons // Pure Appl. Geophys. 1992. Т. 139. С. 507-534; Segall P. Induced stresses due to fluid extraction from axisymmetric reservoirs // Pure Appl. Geophys. 1992. № 139. С. 535-560; Segall P., Grasso J.R., Mossop A. Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France // J. Geophys. Res. 1994. № 99. С. 15423-15438; Baranova V., Mustaqeem A., Bell S. A model for induced seismicity caused by hydrocarbon production in the Western Canada Sedimentary Basin // Canadian Journal of Earth Sciences. 1999. № 36. С. 47-64; McGarr, A., Simpson D., Seeber L. Case Histories of Induced and Triggered Seismicity // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A London: Academic Press, 2002. С. 647-661; Ottemöller L. [et al.]. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. Geophys. Res. 2005. Т. 110. № B10301. С. 1-15; Van Eijs R., Mulders F., Nepveu M. et al. Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands // Environmental

Geology. 2006. № 84. С. 99-111; Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.; Suckale J. Induced seismicity in hydrocarbon fields // Advances in Geophysics. 2009. № 51. С. 55-106), когда производственная деятельность на нефтегазовых месторождениях привела к осязательному изменению динамики сейсмического режима. Ниже приводятся обобщенные механизмы возбуждения таких событий, учитывая отечественный и зарубежный опыт изучения подобных явлений.

Во-первых, значительное увеличение естественного пластового давления, вызванное закачкой жидкости, приводит к уменьшению нормальных напряжений в геосреде, вследствие чего происходит образование разрывов согласно критерию Кулона-Мора (Рисунок 7). Возбуждение микроземлетрясений и/или слабых землетрясений может происходить в осадочном чехле или в самой залежи. Энергия таких событий обычно не велика и ограничена по магнитуде $M \sim 3.0$.

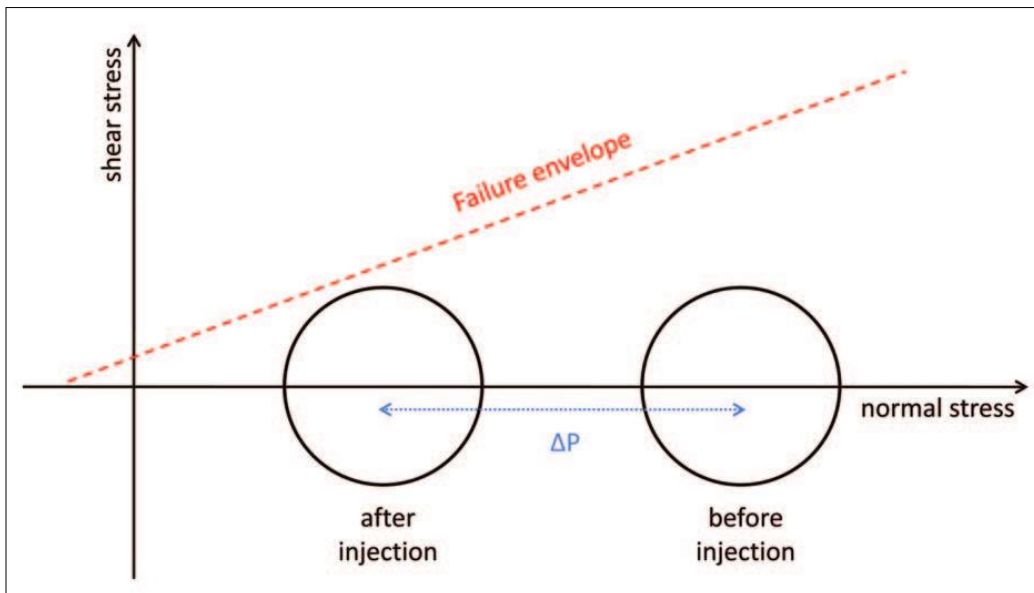


Рисунок 7. Диаграмма Кулона-Мора, иллюстрирующая связь между закачкой жидкости и уменьшением нормального напряжения скелета горного массива, приводящее в совокупности к возникновению разрыва.

Во-вторых, декомпрессия в пласте вследствие отбора углеводородного сырья вызывает уплотнение рыхлых и слабоцементированных структур, приводящее к проседанию поверхности земли и возможному возбуждению микросейсмической активности на малых глубинах. Значительное снижение естественного пластового давления способно вызвать упругие напряжения в пористой среде вокруг залежи, что в свою очередь может привести к сбросообразованию в структурах, окружающих залежь, и возникновению землетрясений на границах залежи, либо в зоне контакта между породами осадочного чехла и кристаллического фундамента (Рисунок 8). Магнитуда таких событий также не велика, как и в первом случае.

Однако с учетом землетрясения 2001 г. на месторождении Экофиск (Норвегия), рассмотренного в предыдущей главе, магнитуда индуцированных землетрясений может достигать $M=5$ (Ottemöller L. [et al.]. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. Geophys. Res. 2005. Т. 110. № B10301. С. 1-15).

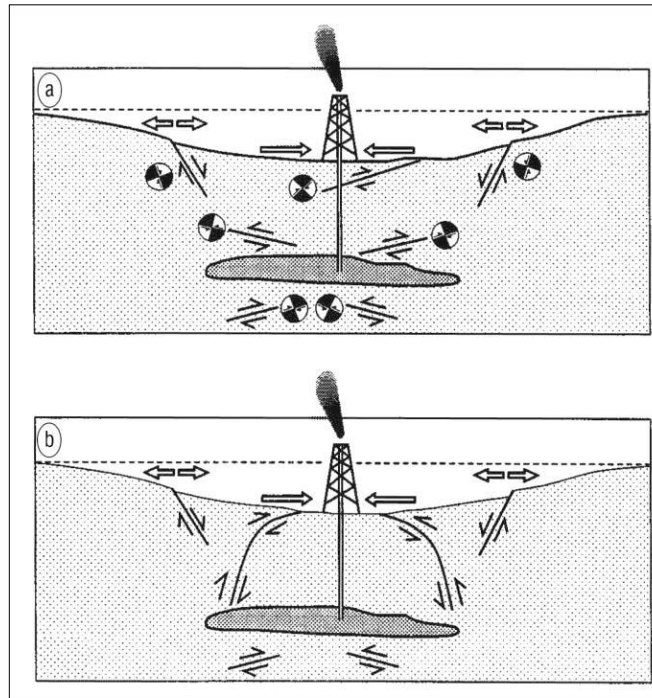


Рисунок 8. Схематический рисунок, иллюстрирующий деформации земной коры, образование разрывов и фокальные механизмы землетрясений, инициированных производственной деятельностью на месторождении: а) – модель пороупругой среды Сигала, б) – модифицированная модель Одона (Suckale J. Moderate-to-large seismicity induced by hydrocarbon production //The Leading Edge. 2010. Т. 29. №. 3. С. 310-319; Odonne F. [et al.]. Abnormal reverse faulting above a depleting reservoir //Geology. 1999. Т. 27. №. 2. С. 111-114).

События, относящиеся к первому или второму случаям, классифицируются в литературе как индуцированные. Отметим, что такие сейсмические проявления происходят, как правило, спустя десятилетия после начала производственной деятельности, когда естественное начальное давление в пласте значительно изменяется (на 50% и более).

В третьих, предполагается, что при продолжительной (20-30 лет) эксплуатации месторождений происходит нарушение равновесных условий в геосреде, что вызывает критическое перераспределение напряжений в самой залежи и вмещающих породах. В совокупности это может спровоцировать разрядку ранее накопленных естественных напряжений в близлежащих зонах с активными тектоническими нарушениями. Такие события классифицируются как триггерные. Энергия триггерных событий не может быть выше энергии землетрясений естественного происхождения. Вероятно, пример самого сильного проявления

триггерной сейсмичности – серия сильных землетрясений (M~7.0) на газовом месторождении (Газли) в Средней Азии (Акрамходжаев А.М., Ситдииков 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. № 86. С. 959-971).

По-видимому, 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.

Рассмотрим, каким образом закачка жидкости может повлиять на нарушение устойчивости разлома. Из простой модели механического движения бортов разлома следует, что движение начинается при достижении сдвиговым напряжением τ величины нормального напряжения σ , умноженного на коэффициент трения покоя μ и увеличенного на величину сцепления τ_0 (критерий Кулона-Мора):

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma \quad (1)$$

Сцепление τ_0 определяется шероховатостью берегов и им обычно можно пренебречь. Коэффициент трения покоя μ для широкого класса пород, в том числе гранитов, габбро, известняков и песчаников, при $\sigma \leq 100$ МПа близок к значению $\mu 0.85$.

Закачанный флюид уменьшает трение в разломах. Давление жидкости или газа, так называемое поровое давление, снижает сжимающие нормальные напряжения. Поэтому для флюидонасыщенного разлома критерий Кулона-Мора можно записать в виде

$$\tau = \mu(\sigma - P_w) \quad (2)$$

Если жидкость свободно сообщается с земной поверхностью, то давление P_w равно гидростатическому $P_w = \rho_w g h$, где ρ_w – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, h – глубина залежи. Поскольку плотность жидкости значительно меньше плотности пород, гидростатическое давление обычно составляет 35-50% литостатического давления, создаваемого весом вышележащих пород. При искусственной закачке жидкости под большим давлением разлом может потерять устойчивость и его берега начнут относительное движение, сопровождающееся землетрясением (после прекращения подачи жидкости землетрясения, спустя некоторое время, прекращаются). Более того, если давление закачиваемой жидкости или газа превысит прочность пород, то возникает разрыв с образованием новых трещин (индуцированный механизм).

Таким образом, изучение известных случаев возникновения техногенных землетрясений показывает, что, если в районах с достаточно высоким уровнем тектонических напряжений

давление закачиваемой жидкости превышает несколько МПа, то это может вызвать появление сейсмических событий в сейсмически спокойных областях. Однако далеко не всегда закачка жидкости под высоким давлением вызывает землетрясения. Условия возникновения техногенных сейсмических событий определяются деформационными процессами, протекающими в данном районе, локальными геомеханическими и гидрогеологическими свойствами пород коллектора и вмещающих пород в области воздействия, уровнем напряжений в данном месте и рядом дополнительных параметров среды и процессов в ней, которые в настоящий момент до конца не изучены (Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.). Следует подчеркнуть разницу между условиями возникновения индуцированной сейсмичности и такими условиями, которые могут послужить «спусковым крючком» для разрядки накопившихся тектонических напряжений посредством «триггерных» землетрясений.

1.4. Критический обзор современных программных продуктов для сейсмологических наблюдений

Все существующие в настоящий момент системы, объединяющие в себе наборы специализированных программ для сейсмологии, можно условно разделить на две группы:

- I. Системы обработки данных реального времени.
- II. Системы постобработки.

К группе I относятся системы выполняющие первичную регистрацию данных о движениях грунта и рутинную обработку непрерывного потока волновых форм с удалённых сейсмических станций в автоматическом режиме. Такие системы объединяют в себе программное обеспечение функционирующее на удалённых узлах, протоколы передачи данных, программы обработки волновых форм и архивации. Как правило, вся зарегистрированная информация поступает на центральный компьютер или вычислительный кластер - центр обработки данных, где поток волновых форм непрерывно анализируются на предмет сейсмических проявлений по заданному набору правил. Основные процессы функционирующие в рамках таких правил это рутинная обработка сейсмических данных, фильтрация шумовых проявлений, корректная архивация исходных волновых форм. Системы обработки информации в режиме реального времени, доступные с открытым исходным кодом, представлены следующими программными продуктами EARTHWORM (Earthworm Central, new site for the Earthworm software and community: электронный ресурс⁴), SEISCOMP3 (The project site of SeisComP3: электронный ресурс⁵),

⁴ <http://earthwormcentral.org>

⁵ <https://www.seiscomp3.org>

RTQUAKE (Utheim T. [et al.]. RTQUAKE, A Real-Time Earthquake Detection System Integrated with SEISAN //Seismological Research Letters. 2014. Т. 85. №. 3. С. 735-742.).

ПО EARTHWORM, разрабатываемое с 1993 г., первоначально создано в Геологической службе США (Рестон, штат Вирджиния), в настоящее время развивается как отдельный проект (Earthworm User Guide: электронный ресурс⁶). Большинство кода реализовано на языках программирования C/C++. Концепция ПО EARTHWORM предполагает наличие центральной системы, в которую от множества датчиков в режиме реального времени непрерывно поступают данные. Центральная система EARTHWORM считывает и обрабатывает поступившие данные из памяти с помощью программ-модулей, которые выполняют свою отдельную задачу. Поскольку ПО EARTHWORM имеет модульную структуру, функционал системы зависит от конкретной конфигурации. За счёт большого количества расширений, реализованных в виде модулей, система поддерживает практически все существующие, на текущий момент, протоколы передачи сейсмических данных в режиме реального времени, включая SEEDLINK (IRIS SeedLink Overview: электронный ресурс⁷), LISS, RTPD (RTPD Installation and Users Guide, Version 2.1.7.0, Refraction Technology, Inc., 2009: электронный ресурс⁸) и другие. Кроме этого, в системе реализованы различные алгоритмы определения вступления фаз, расчёта магнитуды и рутинной обработки что позволяет адаптировать данную систему практически к любым условиям. Структура хранения данных чётко не регламентирована, однако, за счёт большого набора модулей позволяет реализовать хранение в различных вариантах, включая BUD архив в формате MINISEED (SEED reference manual, SEED Format Version 2.4, 2012: электронный ресурс⁹). Существуют продукты, поддерживаемы Геологической службой США, существенно расширяющие функциональность EARTHWORM, но развивающиеся параллельно: Winston (Winston project page: электронный ресурс¹⁰), Swarm (SWARM, Seismic Wave Analysis and Real-time Monitor: user manual and reference guide, 2011: электронный ресурс¹¹).

Проект SEISCOMP (Weber B. [et al.]. SeisComp3 — automatic and interactive real-time data processing //Geophysical Research Abstracts, 2007. Т. 9. С. 09219.) был создан на базе двух организаций: GFZ German Research Centre for Geosciences (Потсдам, Германия) и gempa GmbH

⁶ <http://love.isti.com/trac/ew/wiki/Earthworm>

⁷ <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink/>

⁸ <http://l2a.ucsd.edu/local/Manuals/RTPD.pdf>

⁹ http://www.fdsn.org/seed_manual/SEEDManual_V2.4.pdf

¹⁰ <http://volcanoes.usgs.gov/software/winston/>

¹¹ http://volcanoes.usgs.gov/software/doc/swarm_v2.pdf

(Потсдам, Германия) в рамках программы GEOFON (Geofon program: электронный ресурс¹²). Большинство кода реализовано на C/C++. Текущая версия SEISCOMP3 использует протокол SEEDLINK для сбора данных в режиме реального времени и протокол ArchLink (Documentation of the Archlink: электронный ресурс¹³) для получения данных в отложенном режиме. Вместе с тем, за счёт дополнительных программ, входящих в состав SEISCOMP3, возможно использование и других протоколов реального времени аналогично функционалу EARTHWORM. SEISCOMP3 имеет собственную файловую структуру организации хранения исходных волновых форм SDS (SeisComP Data Structure (SDS) 1.0: электронный ресурс¹⁴). SEISCOMP3 поддерживает хранение метаданных, включая результаты автоматических определений, в распространённых СУБД таких как MySQL и PostgreSQL. Для запуска SEISCOMP3 требуется запросить именную лицензию у правообладателей, кроме того, некоторые компоненты, например, интерфейсы визуализации данных, имеют закрытый исходный код.

Попытки выполнить подробный сравнительный анализ EARTHWORM и SEISCOMP3 (Olivieri M., Clinton J. An almost fair comparison between Earthworm and SeisComp3 //Seismological Research Letters. 2012. Т. 83. №. 4. С. 720-727) показывают, что системы имеют схожий функциональный уровень. Типичный для EARTHWORM недостаток – отсутствие графического интерфейса, полноценно компенсируется продуктами WINSTON и SWARM.

ПО RTQUAKE, разработанное в Отделении наук о Земле Бергенского университета (Норвегия), является достаточно новой разработкой, стабильная реализация появилась в 2014 году. RTQUAKE обладает сравнительно меньшим функциональным уровнем в сравнении с EARTHWORM и SEISCOMP3, однако, с другой стороны, предполагает гораздо менее сложную конфигурацию. RTQUAKE предполагает обязательное наличие центрального волнового сервера, поддерживающего протокол SEEDLINK. Основным преимуществом RTQUAKE является тесная интеграция с ПО SEISAN.

К группе II относятся системы, выполняющие коррекцию ошибок в автоматических определениях и глубокий всесторонний анализ зарегистрированной информации в автоматизированном режиме. Такие системы представлены следующими программными продуктами: SEISAN (Havskov J., Ottemoller L. SEISAN earthquake analysis software //Seismological Research Letters. 1999. Т. 70. №. 5. С. 532-534), OBSPY (Beyreuther M. et al. ObsPy: A Python toolbox for seismology //Seismological Research Letters. 2010. Т. 81. №. 3. С. 530-533),

¹² <http://geofon.gfz-potsdam.de>

¹³ <http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/archlink>

¹⁴ <http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/slarchive/SDS>

COMPUTER PROGRAMS IN SEISMOLOGY (Herrmann R. B. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research //Seismological Research Letters. 2013. Т. 84. №. 6. С. 1081-1088).

ПО SEISAN, было разработано в Отделении наук о Земле Университета г. Берген (Норвегия). Основная часть кода SEISAN реализована на FORTRAN/C/C++. SEISAN объединяет в себе свыше 200 специализированных компьютерных программ предназначенных для анализа сейсмических данных и результатов обработки. SEISAN имеет единый для всех программ набор конфигурационных файлов, а так же собственную простую файловую базу данных предназначенную для хранения волновых форм и результатов обработки. Все программы SEISAN интегрированы с базой данных. Таким образом, SEISAN гарантирует целостность данных и единый интерфейс для работы с исходной информацией и результатами определений. SEISAN допускает различные варианты конфигураций: локальные и глобальные, что позволяет исследователю во многопользовательских системах самостоятельно проводить эксперименты с использованием параметров (локальных), отличных от общесистемных (глобальных). На локальном уровне могут быть изменены практически все значения глобальной конфигурации, касающиеся обработки сейсмологических данных, например, скоростная модель, координаты сейсмических станций, калибровочные значения измерительной аппаратуры, и т.д.. SEISAN обладает богатыми средствами визуализации полученных результатов, имеет собственную графическую интерактивную программу для обработки непрерывных волновых форм, поддерживает свыше девяти форматов исходных волновых форм, включая MINISEED, SAC, GSE и др.

ПО OBSPY представляет собой каркас программной системы. Основная часть кода реализована на PYTHON. Основное назначение OBSPY – это создание собственного программного обеспечения с выполнением существенных доработок на базе каркаса программной системы. OBSPY, в действительности, занимает промежуточное место между I и II группой, т.к. на основе этого ПО возможно создание систем различного назначения. Существует большое количество программ, базирующихся на OBSPY (Use Cases / Applications Using ObsPy: электронный ресурс¹⁵). OBSPY не имеет чётко регламентированной структуры для хранения исходных данных и результатов обработки, не имеет полнофункциональной интерактивной программы обработки волновых форм. Это связано с идеологией OBSPY, которая нацелена на создание собственных программ.

¹⁵ <https://github.com/obspy/obspy/wiki#use-cases--applications-using-obspy>

Дистрибутив сейсмологических программ *COMPUTER PROGRAMS IN SEISMOLOGY*, разработан в Сент-Луисском университете (Сент-Луис, США). Первые версии программ дистрибутива появились в 1981 году, таким образом, данный набор программ является одним из старейших в своём роде. В целом, *COMPUTER PROGRAMS IN SEISMOLOGY* представляет довольно мощный функциональный интерфейс для работы волновыми формами, в частности, имеет многофункциональный интерфейс для создания синтетических сейсмограмм. Однако, отсутствие чётко регламентированной структуры хранения исходных данных и результатов обработки, необходимость специально подготовки входных данных для различных программ дистрибутива существенно усложняет процесс обработки данных.

1.5. Методы определения параметров близких землетрясений по записям локальных сетей сейсмических станций и оценка магнитуды

1.5.1. Обзор основных подходов к решению задачи определения параметров гипоцентров.

Определение местоположения землетрясения – одна из важнейших задач в практической сейсмологии и большинство сейсмологов вовлечено в решение этой задачи, используя современные подходы в условиях грандиозного роста компьютерных технологий и цифровых сейсмических сетей.

Местоположение землетрясения задается координатами гипоцентра (x_0, y_0, z_0) и временем в очаге t_0 , где x_0, y_0 и z_0 – долгота, широта и глубина очага соответственно. Эпицентр землетрясения – (x_0, y_0). Время в очаге t_0 – время возникновения землетрясения. Для простоты будем считать, что координатами гипоцентра могут быть либо географические, либо Декартовы координаты. В случае крупных землетрясений, когда размер очага достигает нескольких сотен километров, гипоцентр в принципе может быть расположен где-нибудь на плоскости разрыва. Так как параметры гипоцентра определяются по временам первых вступлений сейсмических волн, то координаты и время в очаге должны соответствовать началу процесса вспарывания, считая при этом, что скорость вспарывания трещины меньше, чем скорости распространения сейсмических волн в среде. Стандартные каталоги землетрясений (например, Международный Сейсмологический Центр, ISC) приводят данные о местоположениях, базируемые, прежде всего на времени прибытия короткопериодных P -волн. Это местоположение может весьма отличаться от центроидного времени и местоположения, полученного инверсией тензора момента по длиннопериодным колебаниям. Центроидное местоположение представляет среднее время и местоположение для всего события.

1.5.1.1. Определение по одной станции.

Как правило, параметры гипоцентра определяются, используя времена вступлений нескольких сейсмических волн (как правило, P и S) зарегистрированных на нескольких

сейсмических станциях. Однако существует возможность определения местоположения землетрясения и по одной станции с 3 компонентами движения. Так как P -волны радиально поляризованы, вектор движения P -волны может использоваться для вычисления азимута на эпицентр (Рисунок 9). Радиальная компонента смещения в P -волне регистрируется на горизонтальных составляющих сейсмометра, и отношение амплитуд на горизонтальных компонентах используется для вычисления азимута на эпицентр. При этом есть неоднозначность (180°), так как знак первого вступления (полярность) может быть отрицательным. Таким образом, полярность должна учитываться, чтобы получить правильный азимут. Амплитуда вертикальной компоненты вместе с амплитудой на горизонтальных компонентах используется для определения угла падения сейсмической волны.

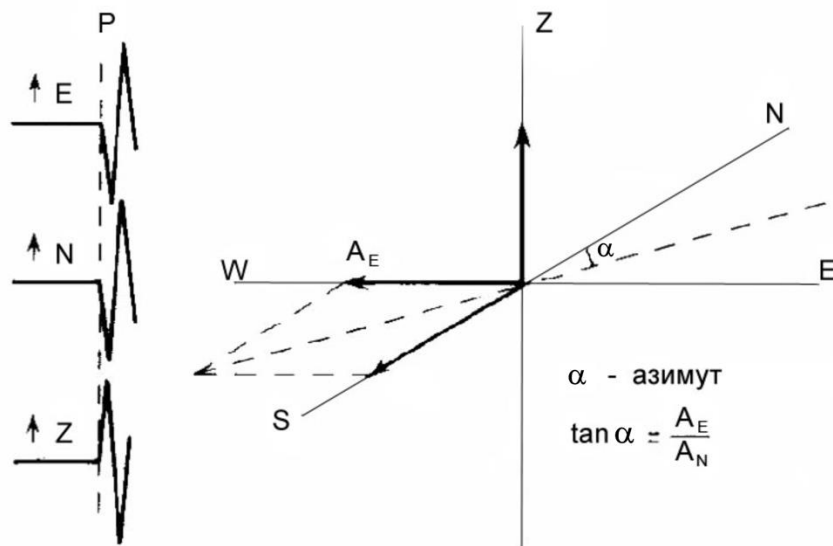


Рисунок 9. Метод определения азимута на эпицентр, используя амплитуды P -волны зарегистрированных на 3-х компонентах движения.

Так как отношение амплитуд между компонентами должно быть неизменным не только для первого колебания P -фазы, но также и для следующих колебаний той же фазы, то можно автоматически вычислить азимут и угол падения (Тихонов И. Н. Автоматическое определение азимута на эпицентр землетрясения с помощью ЭВМ по записи одной станции // Геология и геофизика. 1975. №. 5. С. 105-111.; Robert R.G., Christofferson A., Cassedy F. Real time event detection, phase identification and source location using single station 3 component seismic data and a small PC // Geophysical Journal. 1989. Vol. 97. P. 471-480) используя современные цифровые данные.

После того, как определены азимут на эпицентр и угол падения, расстояние можно получить по разности времен пробега двух фаз, обычно P и S . Если предположить постоянную

скорость распространения сейсмических волн, то

$$t_P = t_0 + \Delta/V_P \text{ и } t_S = t_0 + \Delta/V_S \quad (3)$$

где t_P и t_S – времена вступлений P - и S -волн соответственно, V_P и V_S – P - и S -скорости соответственно, и Δ – эпицентральное расстояние. Используя (3) найдем Δ

$$\Delta = (t_S - t_P) \frac{V_P V_S}{V_P - V_S} \quad (4)$$

Если принять отношение $\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{3}$, то получим эмпирическое правило: $\Delta = (t_S - t_P) \times 9.0$ для средней скорости распространения P -волны 6.6 км/с, справедливой во многих регионах. На больших расстояниях от очага можно использовать таблицы времен прихода (годографы) для определения эпицентрального расстояния. Наконец, зная расстояние, мы можем вычислить время пробега сейсмических волн и получить время в очаге t_0 .

1.5.1.2. Метод засечек.

Когда, по крайней мере, доступны данные трех станций, простое ручное определение может быть сделано с помощью метода засечек (Рисунок 10). Определим на карте круги с центром в точке расположения сейсмостанции и радиусом равным эпицентральному расстоянию, измеренному по разности S-P. Круги пересекутся в области, где находится эпицентр. Эти круги будут редко пересекаться в одной точке, что указывает на наличие ошибок в наблюдениях. Существуют методы определения глубины очага, использующие метод засечек (Bath M. Introduction to seismology. Birkhäuser: 2013. P. 428), однако они редко применяются и здесь обсуждаться не будут.

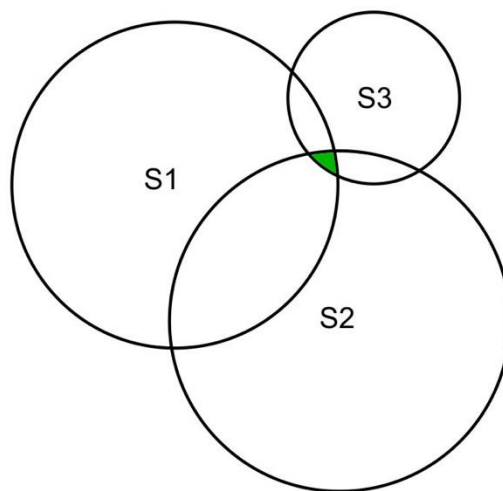


Рисунок 10. Определение местоположения эпицентра методом засечек. Станции расположены в S1, S2 и S3. Эпицентр находится в пределах закрашенной области, где круги пересекаются.

Время в очаге можно определить по нескольким станциям, используя простой графический прием (график Вадати). Используя уравнение (3) найдем время пробега $S-P$:

$$t_S - t_P = \left(\frac{V_P}{V_S} - 1 \right) \times (t_P - t_0) \quad (5)$$

Рассмотрим соотношение времен пробега $S-P$ в зависимости от абсолютного времени пробега P -волны. Наклон графика Вадати (Рисунок 11) соответствует отношению скоростей V_P к V_S . Однако, это соотношение справедливо для одного типа фаз, например Pg и Sg или Pn и Sn , то есть когда времена пробега соответствуют одинаковому пути распространения сейсмических волн. После того, как определен наклон графика Вадати, время в очаге для рассматриваемого землетрясения можно найти из (5).

Диаграмма Вадати может оказаться очень полезной для независимых проверок наблюдаемых времен пробега. Любые отклонения от соответствующей линейной зависимости могут означать неправильную идентификацию рассматриваемых волн (например, разные типы фаз).

Ручные методы определения координат гипоцентров дают понимание проблемы в задаче определения местоположения землетрясений, однако, практически используются компьютерные методы. В следующих разделах, будут обсуждены алгоритмы определения координат гипоцентров компьютерными методами.

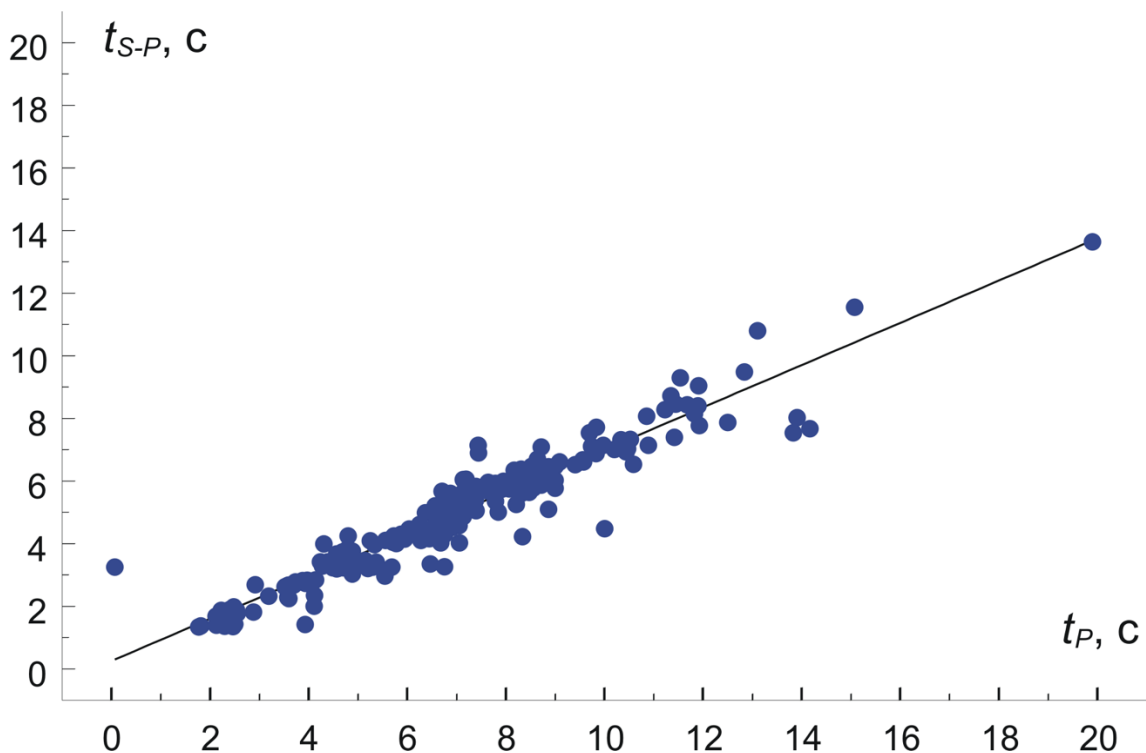


Рисунок 11. Пример графика Вадати для землетрясений на юге Сахалина, зарегистрированных локальной сетью. Наклон графика – 0.72, отношение $V_P/V_S - 1.72$.

1.5.1.3. Метод инверсии. Алгоритм Гейгера.

В большинстве случаев параметры гипоцентров землетрясений определяются при помощи метода инверсии времен пробега, принятого в мировой практике полевых сейсмологических наблюдений в качестве основного. 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} (P- или S-волны) на i -ой сейсмической станции может быть записано в виде

$$t_i^{cal} = t_0 + T(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0), \quad (6)$$

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 (6). 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 (6) в ряд Тейлора по степеням поправок, и оставляя лишь первые члены в разложении, найдем остаточную разность r_i (невязку):

$$r_i = \left(\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) \Delta x + \left(\frac{\partial T}{\partial y_i}\right) \Delta y + \left(\frac{\partial T}{\partial z_i}\right) \Delta z + \Delta t, \quad (7)$$

где

$$r_i = t_i^{obs} - t_i^{cal}, \quad (8)$$

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

Данные уравнения комбинируются для всех станций, путем такого объединения (7) и (8), чтобы получить систему линейных уравнений в виде

$$W r = W G X, \quad (9)$$

где r – вектор остаточных разностей; G – матрица, содержащая частные производные; X – вектор неизвестных поправок, которые необходимо определить; и 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 (9) 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.

1.5.1.4. Метод двойных разностей (ДР): основные положения.

Ошибки в скоростной модели эффективно минимизируются при использовании методов относительного определения положения очагов землетрясений (Poupinet G., Ellsworth W. L., Frechet J. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California. 1984). Если расстояние между гипоцентрами двух землетрясений мало в сравнении с расстоянием между очагами землетрясений и станцией, а также длиной волны скоростной неоднородности, тогда лучевые трассы из области источников совпадают на протяжении почти всего луча. В этом случае, разница во временах пробега для двух наблюдаемых событий может быть отнесена к пространственной разнице в местоположении источников. Формализуем данный подход.

Рассчитанное время вступления t_k^i (P - или S -волны) от i -го землетрясения, наблюдаемое на k -ой сейсмической станции, выражается, в рамках лучевой теории, как интеграл пути вдоль луча:

$$t_k^i = t_0^i + \int_i^k u ds \quad (10)$$

где t_0^i – время в очаге i -го события, u – поле медленности вдоль пути луча, и ds – элемент длины пути. Вследствие нелинейных соотношений между временами пробега и положениями землетрясений, в общем случае используются усеченные ряды Тейлора (Geiger L. Probability method for determination of earthquake epicenters from the arrival times only // Bul. St. Louis Univ. – 1912. Vol. 8. P. 60–71) для линеаризации уравнения (10). В этом случае разность времен пробега для i -го события линейно относится к возмущениям Δm^i (к четырем текущим гипоцентральных параметрам Δx^i , Δy^i , Δz^i , Δt^i для каждого наблюдения k):

$$\frac{\partial T_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i \quad (11)$$

где $r_k^i = (t^{obs} - t^{cal})$, t^{obs} и t^{cal} – измеренные и рассчитанные времена пробега соответственно, и $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta t^i)$.

Уравнение (11) используется совместно с измеренными временами вступлений. Однако кросскорреляционные методы определяют разницу времен вступлений между событиями $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$, следовательно, уравнение (11) не может быть использовано напрямую. Рассматривая разность между уравнениями (11) для пары событий, уравнение для относительных разностей между гипоцентрами землетрясений i и j может быть записано в виде

$$\frac{\partial T_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij} \quad (12)$$

где $\Delta m^{ij} = (\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}, \Delta z^{ij}, \Delta t^{ij})$ – изменение в относительных положениях между двумя гипоцентрами i и j , частные производные T по m – компоненты вектора медленности вдоль луча, соединяющего источник и приемник, измеренные в источнике (Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х томах / пер. с англ. М.: Мир, 1983. 880 с.). Заметим, что в уравнении (12) источник – это, фактически центроид двух гипоцентров, в предположении, что вектор медленности неизменен для двух событий. Величина dr_k^{ij} в уравнении (12) – это остаточная разность между измеренными и рассчитанными временами вступления, определяемая как

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (13)$$

Определим уравнение (13) как двойную разность. Заметим, что уравнение (13) позволяет использовать, как фазы с измеренными временами вступлений, где входными параметрами являются абсолютные времена пробега, так и кросскорреляционные относительные разности времен вступлений сейсмических волн.

Предположение о постоянном векторе медленности верно для событий, которые достаточно близки друг от друга, но нарушается в случае, если события значительно удалены. В общем случае уравнение остаточной разности между двумя событиями i и j получается из (11):

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij} \quad (14)$$

Данное уравнение комбинируется для всех событий и всех станций, путем такого объединения (13) и (14), чтобы получить систему линейных уравнений в виде

$$W G m = W d \quad (15)$$

где G – матрица с размером M на $4N$, (M – число двойных разностей; N – число событий) содержащая частные производные, d – вектор, содержащий двойные разности (13), m – вектор $[\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t]^T$ длины $4N$, содержащий поправки к координатам гипоцентров, которые

необходимо определить, и 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. Как правило, система уравнений типа (15) решается методом сопряженных градиентов (Paige C. C., Saunders M. A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares //ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 1982. Т. 8. №. 1. С. 43-71.) или методом декомпозиций.

Метод двойных разностей (Waldhauser F., Ellsworth W.L. HypoDD – A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations. US Geological Survey Open-File Report. 113 p.; Коновалов А. В. и др. Структура и особенности сейсмического режима очаговой зоны Такойского землетрясения 1 сентября 2001 г.(M w 5.2) //Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. №. 2. С. 93-101) эффективен для совместного переопределения положения гипоцентров в случае совокупности близко расположенных очагов и позволяет одновременно переопределять местоположения большого числа гипоцентров землетрясений на относительно больших удалениях от наблюдающих станциях. Объединяя разности времен пробега P - и S -волн, полученные из кросскорреляционного анализа, с разностями времен пробега, полученными из каталога и минимизируя остаточные разности (или двойные разности) для пар землетрясений, можно минимизировать векторную разницу между положениями их гипоцентрами. Таким образом, можно уточнить расстояние между событиями без использования станционных поправок

1.5.2. Методы определения параметров землетрясений, используемые в настоящей работе.

В системе, рассматриваемой в настоящей работе, в качестве основного метода определения параметров землетрясений используется метод инверсии (1.5.1.3). 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. С. 02-171) для автоматических определений. Преимуществами данного метода являются простота программной реализации, высокая точность определений с оценкой погрешности, возможность полной автоматизации процедур локации очага. К недостаткам данной группы методов можно отнести необходимость наличия минимум 3-х (либо 4-х в случае автоматической обработки) зафиксированных первых вступлений P -волн с различных сейсмических станций. Однако, полноценная локальная сеть сейсмических станций, как правило, обеспечивает $N \geq 4$ вступлений P -волн.

В случае если в обработке используются данные не более трех станций, то первоначальное положение гипоцентра и время в очаге определяется на этапе постобработки методом 1.5.1.1 (данные об азимуте на станцию) с использованием локальных таблиц времен пробега сейсмических волн (годографов). Затем найденные значения являются входными данными для метода инверсии, после чего уточняются координаты гипоцентра и время в очаге. В процессе многолетних наблюдений скоростная модель будет уточняться, а параметры гипоцентров землетрясений, занесенные в базу данных, будут автоматически переопределены, с полным обновлением базы данных и сохранением истории вносимых изменений.

Точность определения координат гипоцентров зависит от геометрии сети, доступных фаз, точности измерения времен вступлений и региональной скоростной модели строения земной коры (Gomberg J.S., Shedlock K.M., Roecker S.W. The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation // *Bul. Seis. Soc. Am.* 1990. Vol. 80. P. 1605–1628; Pavlis G.L. Appraising earthquake hypocenter location errors: a complete, practical approach for single-event locations // *Bul. Seis. Soc. Am.* 1986. Vol. 76. P. 1699–1717). Использование одномерной скоростной модели для определения координат ограничивает точность, так как трехмерные вариации скоростей сейсмических волн могут внести систематические смещения в рассчитываемых временах пробега. Частичный учет вариации скоростей возможен внесением станционной поправки в алгоритм расчета или скоростную модель земной коры (Douglas A. Joint epicenter determination // *Nature*. 1967. Vol. 215. P. 47–48; Pujol J. Comments on the joint determination of hypocenters and station corrections // *Bul. Seism. Soc. Am.* 1988. Vol. 78. P. 1179–1189).

1.5.3. Оценка магнитуды.

Определение локальной магнитуды землетрясения осуществлялось полосовой фильтрацией исходной волновой формы в диапазоне частот от 1 до 20 Гц с последующим синтезом сейсмограммы Вуда-Андерсона. В случае микроземлетрясений используются более узкополосные фильтры для устранения коротко- и длиннопериодных микросейсм. Поиск максимальной амплитуды осуществлялся на вертикальной компоненте в первых 10 секундах записи S-волны в соответствии с практическими рекомендациями Международной комиссии по сейсмологическим наблюдениям и интерпретации данных IASPEI.

Для расчёта локальной магнитуды 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):

$$M_L = \log A + a \log R + b R + c, \quad (16)$$

где A – максимальная амплитуда поперечных волн в нм/с; R – эпицентральное расстояние в км, $a = 1.84 \pm 0.26$, $b = 0.0011 \pm 0.0014$ и $c = -2.97 \pm 0.34$. Станционные поправки к магнитуде

приведены в Таблице 2, их диапазон составил от -0.41 до $+0.14$. Поправка к магнитуде для станции CHIVO оценивалась отдельно по разности независимых определений магнитуд для этой станции и всей сети в целом. Больше, по сравнению с остальными пунктами, значение поправки к магнитуде для станции ОКН, обусловлено, по всей видимости, грунтовыми условиями (пески).

Код станции	Местоположение	Расположение			Комплектация		Станционная поправка
		Широта	Долгота	Высота, м	Регистратор	Датчик	
ОКНА	г. Оха	53 35.58	142 56.43	10	Datamark LS- 7000XT	L-4	-0.41
SABO	п. Сабо	53 08.80	142 56.60	15	SMART- 24R	KS- 2000/SP	+0.14
CHIVO	береговой комплекс переработки «Чайво»	52 30.00	143 10.40	10	SMART- 24R	KS- 2000/SP	-0.10
NGLK	п.г.т. Ноглики	51 47.00	143 07.50	10	SMART- 24R	KS- 2000/SP	+0.06
ARGI	п. Арги-Паги	51 21.00	142 44.00	10	SMART- 24R	KS- 2000/SP	+0.08
TMSK (TYV)	п.г.т. Тымовское	50 51.80	142 39.40	160	Datamark LS- 7000XT	L-4	+0.14

Таблица 2. Параметры станций и поправки к локальной магнитуде.

1.6. Выводы

В настоящей главе представлен обзор известных случаев возникновения техногенной сейсмичности, напрямую связанной с промышленным освоением месторождений нефти и газа. 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 сейсмических 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 видно, 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. 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. Поэтому 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. вблизи 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, с учётом 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.

Глава 2. Разработка автоматизированной системы сбора, передачи, хранения и обработки сейсмологических данных на Северном Сахалине.

В настоящей главе рассматриваются программы, технологии и комплексные системы построенные на открытом исходном коде либо допускающие какие-либо не ключевые компоненты с закрытым кодом, но имеющие открытую архитектуру. Подобный подход к выбору технологий пригодных для внедрения с целью решения, в первую очередь, научных задач, позволяет интегрировать с текущим набором программ новые разработки с опорой на открытую платформу. Преимущества выбора программ с открытым исходным кодом гарантирует наличие возможности проверить реализацию конкретного алгоритма, математической модели, а так же установить ошибки и неточности в расчётах, если таковые возникнут. Кроме того, различные варианты лицензирования открытого исходного кода позволяют модифицировать текст программы, что даёт исследователю качественно новые возможности. Современные технологии в области сейсмологического мониторинга решают, в общем случае, следующие задачи: сбор зарегистрированных данных с удалённых станций в режиме реального времени, рутинная обработка данных в автоматическом/автоматизированном режиме, регистрация результатов обработки, архивирование непрерывных волновых форм, глубокий всесторонний анализ зарегистрированных сейсмических событий. Под рутинной обработкой обычно понимают выполнение операций над набором исходных данных с целью определения координат и глубины гипоцентра, магнитуды сейсмического события, сотрясаемости и пиковых ускорений грунта, а так же возможных ошибок в расчётах.

Разработка технологических компонент была выполнена на базе современного и свободно распространяемого программного обеспечения с открытым исходным кодом. При разработке системы мониторинга особое внимание было обращено на современную отечественную измерительную аппаратуру для унификации форматов данных, протоколов передачи и стандартов обработки, в том числе и с мировыми аналогами (Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В. Новая архитектура сбора, хранения и обработки сейсмологических данных // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С. 27-38.).

2.1. Предпосылки для создания и развития сети детальных сейсмологических наблюдений

Остров Сахалин – регион России, в котором отмечается высокий уровень тектонической активности. За последние 15 лет в северной части острова произошло несколько сильных землетрясений: катастрофическое Нефтегорское ($M_w=7.1$) в 27 мая 1995 г., Пильтунское ($M_w=5.6$) 12 июня 2005 г, Уангское ($M_w=5.8$) 16 марта 2010 г.

Вместе с тем, на территории острова и его прибрежном шельфе расположены объекты нефтегазодобывающей промышленности и инфраструктурные сооружения для транспортировки

полезных ископаемых. «Сахалин-1» (Сахалин 1: электронный ресурс¹⁶) и «Сахалин-2» (Сахалин 2: электронный ресурс¹⁷) – наиболее известные реализующиеся проекты в этой сфере. Наиболее крупные месторождения шельфа Сахалина: Чайво, Одопту, Аркутун-Даги, Пильтун-Астокское, Лунское, активная разработка которых ведётся с 2005 г.

Так, в 1991 г. консорциум нефтяных и инвестиционных компаний («Сахалин-2») выиграл тендер на право разработки нефтяного «Пильтун-Астокского» и газового «Лунского» месторождений. Через пять лет начался практический этап работы на шельфе. Ключевым решением, отличным от традиционного освоения месторождений суши, оказался принцип поэтапного освоения. Компанией «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани, Лтд.», оператором проекта «Сахалин-2», было принято решение на разработку наиболее подготовленного нефтяного участка «Пильтун-Астокского» месторождения (Рисунок 12). За три года с момента начала проекта (1996 г.) была модифицирована для добычи нефти и установлена в море буровая платформа «Моликпак». В 1999 г. началась сезонная, в межледовый период, добыча нефти. В 2006 г. начался этап установки платформ, ввода и отладки всех объектов, а затем – круглогодичная добыча нефти и газа на «Пильтун-Астокском» месторождении.

В рамках проекта «Сахалин-1» компанией «Эксон Нефтегаз Лимитед», дочерней компанией корпорации «ЭксонМобил» и оператором международного консорциума «Сахалин-1», ведётся освоение трех морских месторождений: «Чайво», «Одопту» и «Аркутун-Даги» (Рисунок 12), расположенных на северо-восточном шельфе о. Сахалин.

Добыча нефти и природного газа на месторождении «Чайво» началась в октябре 2005 г. Промышленное производство нефти и газа на месторождении «Одопту» началось в сентябре 2010 г.

Разработка месторождения «Аркутун-Даги», расположенного приблизительно в 25 км от северо-восточного побережья о. Сахалин, к востоку от месторождения «Чайво», предусматривает также добычу нефти и газа. Транспортировка нефти и газа будет осуществляться по промысловому трубопроводу на существующий береговой комплекс подготовки продукции «Чайво», а затем по существующим трубопроводам. Ввод в эксплуатацию месторождения «Аркутун-Даги» стартовал в конце 2014 г.

Основные нефтегазовые объекты на севере острова расположены в зоне активных тектонических нарушений разного ранга и возраста, выявленных по результатам многочисленных геолого-геофизических, сейсмологических и палеосейсмологических

¹⁶ <http://en.wikipedia.org/wiki/Sakhalin-I>

¹⁷ <http://en.wikipedia.org/wiki/Sakhalin-II>

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. Совокупность вышеописанных факторов послужила основанием для создания и развития системы сейсмического мониторинга (Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В. Новая архитектура сбора, хранения и обработки сейсмологических данных // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С. 27-38), в том числе мониторинга наведенной сейсмичности.

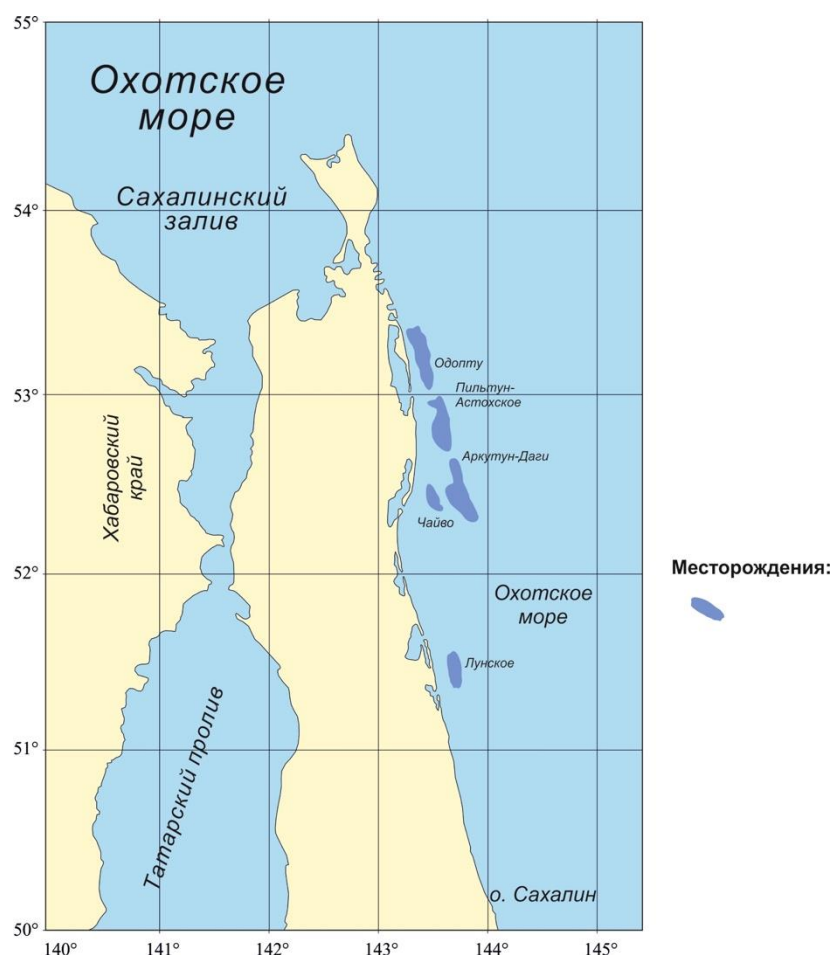


Рисунок 12. Нефтегазовые месторождения, эксплуатируемые в рамках проектов «Сахалин-1» и «Сахалин-2»

2.2. Концепция развития автоматизированной системы детальных сейсмологических наблюдений на Северном Сахалине

Учитывая высокую частоту возникновения сейсмических событий на севере о. Сахалин, требуется решить первостепенную задачу по автоматизации таких процессов, как трансфер

данных от удаленных станций, автоматическое детектирование сейсмических событий в потоке цифровых данных и оперативное определение очаговых параметров землетрясений в условиях нестабильной связи с удалёнными сейсмостанциями. Система должна обеспечивать многофункциональный интерфейс для выполнения операций постобработки для всестороннего анализа естественной и, возможно, триггерной и наведённой сейсмичности.

Сеть сейсмических станций, как часть системы, должна отвечать специальным требованиям с учётом особенностей региона. Набор регистрирующей аппаратуры должен обеспечить уверенную регистрацию сейсмических событий с $M_L > 3$ в автоматическом режиме и $M_L > 2$ в автоматизированном режиме с участием оператора. Набор сейсмических датчиков, представленный акселерометрами, широкополосными и короткопериодными приборами должен гарантированно регистрировать как малые проявления сейсмичности, так и мощные землетрясения любой природы. Расстановка узлов сети сейсмических станций должна быть выполнена таким образом, что бы наблюдаемая территория была равномерно покрыта удалёнными приборами с целью минимизации ошибок в определениях. Кроме того, необходима такая конфигурация сети, которая позволит определённой точностью регистрировать события на шельфе при отсутствии сейсмических станций установленных в море. Обязательным является монтаж приборов вблизи активно эксплуатируемых месторождений углеводородов с целью контроля триггерной сейсмичности. Архитектура системы должна обеспечивать расширение всех компонентов, включая сейсмические станции, вычислительное оборудование, увеличение числа пользователей без остановки самой системы.

Концепция развития системы предусматривает базовый функциональный уровень системы который гарантирует выполнение операций указанных ниже.

1. Передачу оперативных непрерывных сейсмологических данных в режиме реального времени от удалённых станций с использованием открытых протоколов. Автоматическое определение и восстановление «пропусков» в непрерывном волновом потоке цифровых данных путём запроса данных по времени, сейсмической станции и цифровому каналу сейсмической станции.

2. Автоматическую загрузку данных из региональных и международных сейсмологических центров, в том числе Центров коллективного пользования, по протоколам передачи волновых форм реального времени.

3. Регистрацию непрерывных цифровых данных в базе данных в автоматическом режиме. Добавление в автоматизированном/ручном режиме разноформатных исходных волновых форм, унификация данных и регистрация в центральной базе данных.

4. Организацию архива непрерывных данных в формате MiniSEED, организованных в базе данных, с возможностью автоматизированного поиска и выгрузки из системы набора данных (волновых форм) с указанием критериев/условий по времени, сейсмической станции и цифровому каналу сейсмической станции; поиск и выгрузка должны осуществляться через графический интерфейс.

5. Организацию архива результатов обработки, организованных в базе данных, с возможностью автоматизированного поиска с указанием критериев/условий по времени, магнитуде, координатам гипоцентра, числу фаз участвующих в определении события, погрешности в определении, подклассу события; поиск и выгрузка должны осуществляться через графический интерфейс.

6. Автоматический анализ изменения амплитуды на базе алгоритма STA/LTA по каждому каналу каждой станции в непрерывном волновом потоке цифровых данных с возможностью сохранения в отдельной базе волновых форм выделенного события в формате MiniSEED. Автоматическое определение времён вступления сейсмических волн и тип волны (P/S) для сейсмического события.

7. Многоканальная визуализация непрерывных цифровых данных, поступающих в режиме реального времени. Определение глубины, магнитуды, времени в очаге и координат эпицентра сейсмических событий с возможностью последующего контроля параметров, участвующих в определении: добавление/удаление/фиксирование фаз, переопределение магнитуды, определение азимута.

8. Контроль ошибок в определении с помощью встроенных инструментов: график вадати, спектральный анализ, фильтры волновых форм. Генерацию сейсмологического бюллетеня по заданным параметрам; экспорт результатов обработки в GOOGLE EARTH, цифровые векторные карты и т.п. Интерактивная географическая карта с нанесёнными результатами определений глубины, магнитуды, времени в очаге и координат эпицентра сейсмических событий.

9. Определение параметров механизма очага и тензора сейсмического момента.

10. Создание синтетических сейсмограмм. Построение, уточнение одномерных скоростных сейсмических моделей.

11. Обновление/переопределение параметров локализованных сейсмических событий в базе данных вследствие изменений глобальных конфигурационных файлов, калибровочных файлов станций в автоматическом режиме после выполнения специализированной команды.

Кроме этого, архитектура системы должна обеспечивать быструю интеграцию новых разработанных программ для апробации новых методов анализа данных.

2.3. Технические требования к системе

Требования к системе и, в частности, к архитектуре системы были разработаны с учётом современных тенденций в мировой практике сейсмического мониторинга. 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 представительности информации не ниже уровня действующих на сегодняшний день международных сейсмологических центров.

2.3.1 Требования по назначению системы.

2.3.1.1 Программно-технические решения системы должны быть ориентированы на:

1) выполнение сейсмологических наблюдений в районе шельфовых нефтегазовых месторождений (практическое внедрение);

2) прогноз сейсмичности в связи с техногенным воздействием на геологическую среду;

3) построение объективных экспертных оценок состояния окружающей среды, на которую оказывается техногенное воздействие, с целью избежать негативных последствий от чрезвычайных ситуаций техногенной природы и обеспечить бесперебойную и безопасную работу промышленных объектов.

2.3.1.2 Рекомендации по разработке и эксплуатации аппаратной компоненты системы в неоптимальных условиях наблюдения должны быть ориентированы на:

1) обеспечение бесперебойной работы регистрирующей аппаратуры в условиях крайнего севера, нестабильного электроснабжения, каналов связи, низкой пропускной способности;

2) подбор оптимальных точек размещения регистрирующей аппаратуры на наблюдаемом полигоне для уверенной регистрации естественной и техногенной сейсмичности.

2.3.2 Требования к показателям назначения, техническим характеристикам системы.

2.3.2.1. Разрабатываемый комплекс программных средств системы должен обеспечивать функционирование аппаратных средств мониторинга, отвечающих следующим показателям:

2.3.2.1.1 по функциональным параметрам регистрирующей аппаратуры

а) динамический диапазон – не менее 120 дБ;

б) возможность усиления сигнала – от 0.01 до 10;

в) разрядность АЦП – не менее 24 бит;

- г) частота дискретизации – не менее 100 Гц;
- д) режим записи – непрерывный;
- е) конфигурация сейсмоприёмника – трехкомпонентный;
- ж) чувствительность – не менее 400 В/м/с;
- з) полоса частот регистрации – от 0.01 до 70 Гц;
- и) номинальное энергопотребление – не более 5 Вт.

2.3.2.1.2 по параметрам безотказности регистрирующей аппаратуры

- а) рабочий температурный диапазон – от -10 до + 50 градусов Цельсия;
- б) устойчивость к водяным парам – работоспособность при влажности до 80 %;
- в) гарантированная наработка на отказ при обеспечении требуемых условий эксплуатации – не менее 10000 часов бесперебойной работы.

2.3.2.1.3 по количеству и составу регистрирующей аппаратуры:

- а) число сейсмических станций локальной сети не менее 6;
- б) число сейсмических станций региональных и международных сетей не менее 5;
- в) число короткопериодных датчиков сейсмической сети не менее 6;
- г) число широкополосных датчиков сейсмической сети не менее 5.

Указанные выше показатели (п. 2.3.2.1) сформированы с учётом необходимости регистрировать слабую сейсмичность в широком диапазоне частот. Предполагается, что оборудование, как правило, устанавливается в удалённых северных районах о. Сахалин, где электроснабжение может подаваться с перебоями. Предполагается, что некоторую часть времени, в период эксплуатации, регистрирующая аппаратура будет работать от источников резервного питания (аккумуляторных батарей), поэтому требуется обеспечить минимальный уровень потребления энергии с сохранением возможностей регистрации слабой сейсмичности. Кроме этого, северные районы о. Сахалина отличаются широким годичным температурным диапазоном, что учтено в требованиях.

Минимальные значения по количеству регистрирующей аппаратуры, в составе сейсмической сети, обусловлено необходимостью автоматизации рутинной обработки поступающих данных, т.к. для автоматических локаций требуется минимум четыре чётких вступления сейсмических волн, полученных с разных приборов.

2.3.2.2 Программные компоненты системы должны отвечать следующим показателям:

2.3.2.2.1 по точности и времени определения сейсмического события

- а) погрешность в определении координат эпицентра землетрясения не более 0.1 градуса;
- б) погрешность в определении локальной магнитуды не более 0.2;
- в) время работы системы для автоматического определения времени в очаге, координат гипоцентра и магнитуды не более 3 минут;
- г) минимальное количество станций при расчёте параметров землетрясения с локальной магнитудой $M_L > 3.0$ не менее 4;

2.3.2.2.2 по режиму многопользовательской работы

- а) количество одновременно работающих пользователей с использованием веб-интерфейса не менее 2000;
- б) количество одновременно работающих пользователей с использованием терминального доступа не менее 30;

2.3.2.2.3 по параметрам модулей реализующих функции сбора и архивации сейсмических данных с удалённых станций в режиме реального времени

- а) число одновременно архивируемых каналов сейсмических станций не менее 120;
- б) минимальный частотный диапазон каждого архивируемого канала сейсмической станции 60 – 120 Гц;

2.3.2.2.4 по параметрам модулей базовой обработки потока непрерывных цифровых данных в режиме реального времени

- а) число одновременно обрабатываемых каналов сейсмических станций не менее 120;
- б) минимальный частотный диапазон каждого сейсмического канала возможный для обработки 60 – 120 Гц;
- в) максимально возможный радиус от сейсмической станции до гипоцентра землетрясения не менее 400 км;
- г) количество одновременно визуализируемых каналов в терминальном режиме не менее 250;
- д) разрешении экрана при использовании терминального доступа не менее 1024x768 пикселей.

Рассмотренные выше (п. 2.3.2.2) требования к программным компонентам учитывают точность определений локаций гипоцентра, минимальный набор входной информации для старта локации, и требования к качеству входной информации. Данные требования сформированы для

обеспечения высокого качества автоматизированной обработки данных (пп. 2.3.2.2.1-а, 2.3.2.2.1-б), предъявляемые, на сегодняшний день к международным сейсмическим центрам.

2.3.3 Требования к объектам системы.

2.3.3.1 Состав системы должен иметь модульную структуру – это позволит обеспечить функции масштабирования и независимости отдельных программных компонент.

2.3.3.1.1 Программные модули, реализующие функции сбора и архивации сейсмических данных с удалённых станций в режиме реального времени, должны быть представлены в виде следующих программных реализаций:

а) программный модуль сбора данных с удалённых сейсмических станций использующий протокол передачи волновых форм в режиме реального времени;

б) программный модуль архивации волновых форм, преобразующий волновой поток в файл на сервере хранения данных;

в) программный модуль контроля и коррекции ошибок в результате пропадания устойчивой связи с удалёнными станциями.

2.3.3.1.2 Программные модули базовой обработки потока непрерывных цифровых данных в режиме реального времени должны быть представлены в виде следующих программных реализаций:

а) программный модуль детектирования времён вступления сейсмических волн в цифровом потоке;

б) программный модуль ассоциации времён вступления сейсмических волн с сейсмическим событием;

в) программный модуль расчёта параметров землетрясений (время в очаге, координаты гипоцентра, магнитуда, возможные ошибки в определениях);

г) программный модуль обслуживания клиентов терминального доступа;

д) программный модуль, реализующий процедуры постобработки (уточнение результатов автоматических определений, построение годографов, графиков Вадати, уточнение скоростной модели).

Рассмотренные выше (п. 2.3.3.1.1 – 2.3.3.1.2) требования определяют модульный состав системы необходимый для обеспечения показателей назначения и функциональных требований.

2.3.3.2 Система со стороны функций сбора и архивации сейсмических данных должна обеспечивать:

а) передачу оперативных непрерывных сейсмологических данных в режиме реального времени по протоколу SEEDLINK от удалённых станций;

б) автоматическое определение и восстановление «пропусков» в непрерывном волновом потоке цифровых данных путём запроса данных по времени, сейсмической станции и цифровому каналу сейсмической станции;

в) автоматическую загрузку данных из региональных и международных сейсмологических центров, в том числе Центров коллективного пользования, по протоколам SEEDLINK, AutoDRM;

г) автоматизированную загрузку данных в систему в формате MiniSEED с FTP сервера;

д) организацию архива непрерывных данных в формате MiniSEED в базе данных, от начала запуска системы в эксплуатацию, с возможностью автоматизированного поиска и выгрузки из системы набора данных (волновых форм) с указанием критериев/условий по времени, сейсмической станции и цифровому каналу сейсмической станции (поиск и выгрузка должны осуществляться через графический интерфейс).

е) многоканальная визуализация непрерывных цифровых данных, поступающих в режиме реального времени;

ж) спектральные характеристики цифрового сигнала.

2.3.3.3 Система со стороны базовой обработки потока непрерывных цифровых данных должна обеспечивать:

а) автоматический анализ изменения амплитуды по алгоритму STA/LTA по каждому каналу каждой станции в непрерывном волновом потоке цифровых данных с возможностью сохранения в отдельной базе волновых форм выделенного события в формате MiniSEED;

б) автоматическое определение времени в очаге, координат гипоцентра, магнитуды сейсмических событий с $M_L \geq 3$ в режиме, близком к реальному времени на основе поступающих в систему оперативных непрерывных сейсмологических данных от удалённых станций и данных из региональных и международных сейсмологических центров, в том числе Центров коллективного пользования;

в) круглосуточное оперативное информирование группы ответственных лиц по коммуникационным каналам связи о задержках, «пропусках», полном отсутствии потока данных на каждом канале каждой сейсмической станции в непрерывном потоке цифровых данных;

г) оперативное информирование о возможных сейсмических событиях, автоматически зарегистрированных в непрерывном потоке цифровых данных, с указанием предварительных

данных (время в очаге, координаты гипоцентра, магнитуда, возможные ошибки в определении параметров события);

д) организацию архива результатов обработки в базе данных, от начала запуска системы в эксплуатацию, с возможностью автоматизированного поиска с указанием критериев/условий по времени, координатам гипоцентра, магнитуде, числу фаз, участвующих в определении события, погрешности в определении, подклассу события (поиск и выгрузка должны осуществляться через графический интерфейс);

е) контроль ошибок в определении параметров сейсмического события с помощью встроенных инструментов: график Вадати, спектральный анализ, фильтры волновых форм;

ж) генерацию сейсмологического бюллетеня по заданным параметрам;

з) экспорт результатов обработки в GOOGLE EARTH, цифровые векторные карты;

и) определение параметров механизма очага и тензора сейсмического момента;

к) определение количественных параметров сильных движений грунта на основе измеренных параметров колебаний, координат гипоцентра, магнитуды и параметров механизма сейсмического события; представление их на топографической основе в виде пиковых ускорений, пиковых скоростей и пиковых смещений;

л) создание синтетических сейсмограмм;

м) создание калибровочных файлов станций по типу регистрирующего оборудования;

н) построение, уточнение одномерных скоростных сейсмических моделей;

о) обновление/переопределение параметров сейсмических событий в базе данных вследствие изменений глобальных конфигурационных файлов, калибровочных файлов станций в автоматическом режиме после выполнения специализированной команды;

п) визуализация автоматически вычисленных и скорректированных результатов обработки с указанием времени, затраченного на обработку конкретного события, в виде цифровой карты на базе топографической основы с нанесёнными результатами определений времени в очаге, координат гипоцентра, магнитуды сейсмических событий.

Рассмотренные выше (пп. 2.3.3.2 – 2.3.3.3) требования обеспечивают функции системы со стороны сбора и обработки данных с учётом следующих критериев:

- внедрение используемых на текущий момент в мировой практике протоколов и стандартов для передачи волновых форм в режиме реального времени;

- доступность архивов исходных данных и результатов обработки в любой момент времени;

- внедрение апробированных технологий анализа амплитудных изменений волнового потока, технологий локализации сейсмического события и визуализации результатов;
- внедрение в систему передовых методов глубокого анализа сейсмического события.

2.3.3.6 Архитектура системы должна обеспечивать:

- а) объединение в единую локальную сеть сейсмических станций до 250 удалённых узлов;
- б) прозрачное масштабирование при добавлении аппаратных компонент;
- г) дублирование программных компонент средствами виртуализации на базе системного программного обеспечения XEN версии не ниже 4.2 для обеспечения отказоустойчивости;

Указанные выше (п. 2.3.3.6) требования к архитектуре системы ставят на первое место масштабирование аппаратных и программных компонент, что позволит избежать больших финансовых затрат на этапе начальной реализации системы.

2.3.3.7 Система должна строиться на базе следующих основных протоколов и стандартов передачи информации.

- а) Ethernet – набор протоколов передачи данных для связи локальных узлов на канальном уровне.
- б) TDM/TDMA, DVB-S, GPRS/EDGE – протокол передачи на канальном уровне на участках сети, связывающих удалённые станции с центром обработки данных.
- в) TCP/IP – стек протоколов для передачи данных на сетевом уровне между удалёнными компонентами системы.
- г) iSCSI – высокоуровневый протокол передачи данных для связи локальных узлов системы с центральным хранилищем.
- д) FibreChannel – семейство высокоуровневых протоколов для связи локальных узлов системы с центральным хранилищем.
- е) SEEDLINK, ARCLink, LISS – высокоуровневые протоколы передачи инструментальных данных от удалённых станций и станций международных сетей сейсмологических наблюдений.
- ж) FTP, HTTP/HTTPS, SMTP/SMTSPS – высокоуровневые протоколы для взаимодействия с внешними системами.
- и) MiniSEED – формат данных цифровой информации, поступающей с регистрирующей аппаратуры.

к) SEISAN – формат данных для волновых форм, содержащий выделенные сейсмические события.

л) Nordic – формат данных, элемент базы данных SEISAN, содержащий информацию об обработанных событиях.

Указанные выше (2.3.3.7) стандарты и протоколы передачи информации определены на основе анализа существующего открытого ПО в области сбора и обработки сейсмологической информации.

2.3.3.8 Система должна функционировать на технических средствах:

а) производительность центрального процессора сервера приложений не менее 140 GFlops/s;

б) максимальная тактовая частота центрального процессора сервера приложений не менее 2.6 ГГц;

в) количество вычислительных ядер центрального процессора сервера приложений не менее 6;

г) набор команд центрального процессора сервера приложений 64-bit;

д) объём оперативной памяти сервера приложений не менее 90 гигабайт;

е) пропускная способность оперативной памяти сервера приложений не менее 12800 Мбайт/с

ж) пропускная способность интернет канала связи для организации телеметрии не менее 20 Мбит/с;

з) общее дисковое пространство сервера хранения данных не менее 10 терабайт;

и) скорость интерфейса передачи данных сервера хранения данных не менее 10 Гбит/с.

Указанные выше (п. 2.3.3.8) требования учитывают в первую очередь объёмы предполагаемой информации (исходной и созданной) которая будет аккумулирована и обработана средствами системы, а также обеспечивают вычислительную мощность для реализации функциональных требований системы.

2.3.3.9 Требования к информационной и программной совместимости

а) Система должна выполняться в операционных системах GNU/Linux с версией ядра не ниже 2.16;

б) исполняемые программные компоненты системы должны быть реализованы на одном из следующих компилируемых языков программирования: C, C++, C#, Fortran;

в) web технологии в составе системы должны быть реализованы на одном из следующих интерпретируемых языков программирования Ruby, Python, Perl, php.

Указанные выше (п. 2.3.3.9) требования призваны обеспечить запуск системы на открытых операционных системах с возможностью доработки ПО на одном из распространённых системных языков программирования.

2.4. Архитектура и практическая реализация системы на примере сети детальных сейсмологических наблюдений на Северном Сахалине

Архитектура системы была разработана с учётом существующей международной 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.

В основе разработанной архитектуры лежит концепция виртуальной сейсмической сети (ВСС) (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, где осуществляется последующая обработка, анализ и хранение данных. Данные поступают в систему в режиме, близком к реальному времени, – информация собирается со всех узлов в непрерывном режиме, задержка может варьироваться от 5 секунд до 12 часов.

Архитектура системы логически разделена на следующие подсистемы:

- подсистема регистрация данных;
- подсистема сбора и передачи данных;
- подсистема хранения данных и результатов их обработки;
- подсистема обработки данных;
- подсистема визуализации данных и результатов их обработки;
- подсистема автоматического контроля за состоянием сети наблюдений.

На практике в состав реализаций конкретных программ и модулей системы входит функционал, который перекрывает области действия вышеуказанных подсистем. С точки зрения внедрения, обслуживания и поддержки необходимо принять понятие службы, которая реализована в виртуальной среде и функционирует в собственном окружении операционной системы Linux (Рисунок 13).

Одновременный доступ к данным, расположенным в хранилище, имеют четыре основные службы системы, выполняющие функционал вышеуказанных подсистем. Эти службы работают в отдельных виртуальных контейнерах с полным резервированием. Связь между службами системы осуществляется посредством стека протоколов TCP/IP (Socolofsky, T.A TCP/IP Tutorial. RFC 1180, 1991: электронный ресурс¹⁸).

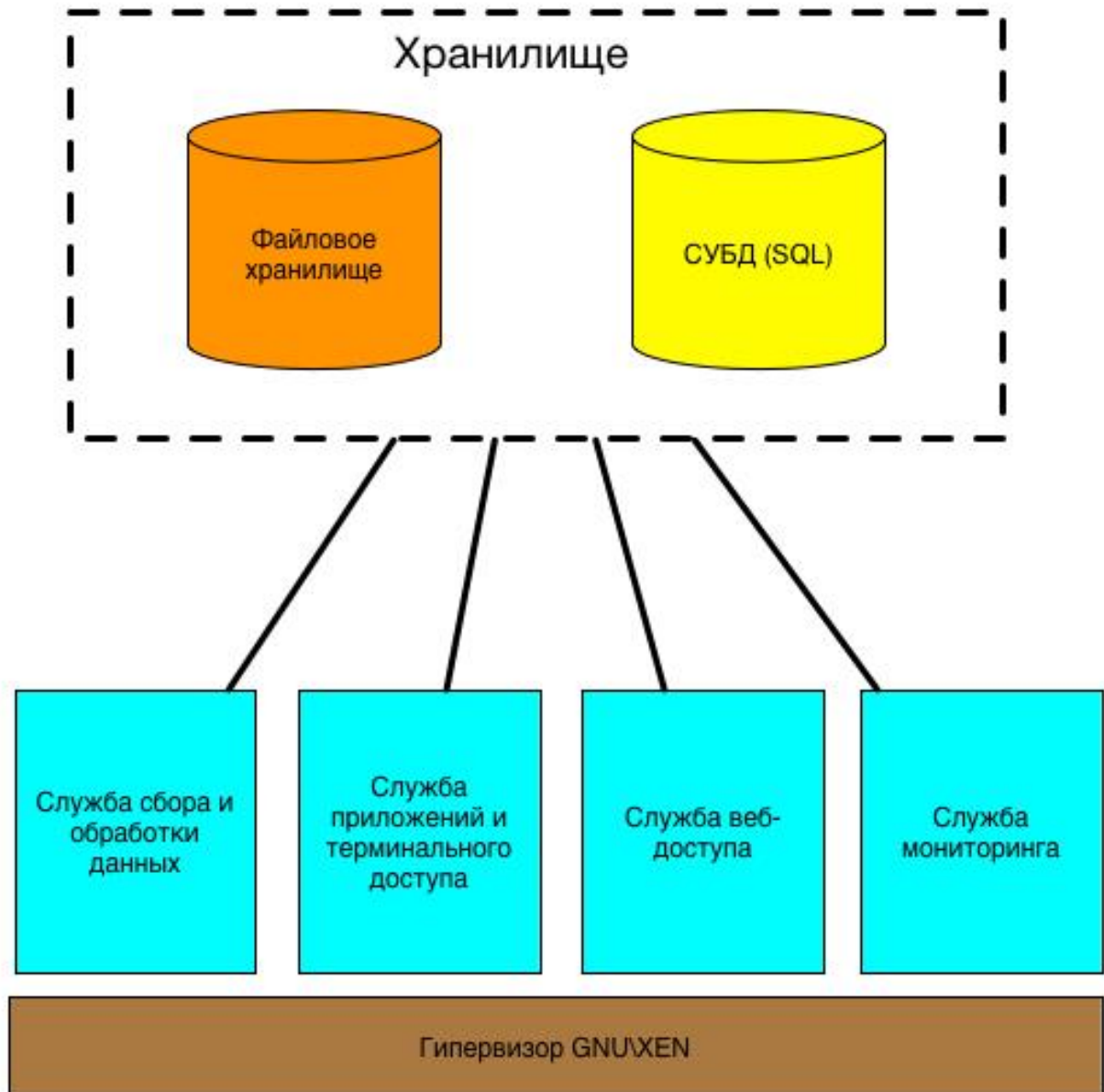


Рисунок 13. Архитектура системы.

2.4.1. Служба сбора и обработки данных

Служба выполняет роль сборщика и автоматической обработки данных от сейсмических узлов в рамках концепции ВСС. Универсальные протоколы обмена данными в режиме реального

¹⁸ <http://tools.ietf.org/pdf/rfc1180>

времени такие как SEEDLINK позволяют интегрировать данные от локальных, региональных и международных сейсмических сетей. Обработка данных выполняется по следующим направлениям: фильтрация потока зарегистрированных данных, анализ зарегистрированных данных на предмет сейсмических проявлений, определение параметров сейсмических проявлений. Дополнительно, служба выполняет роль архиватора зарегистрированных данных и результатов обработки для обеспечения доступа к этим данным других служб.

2.4.2. Служба приложений и терминального доступа

Это основная служба, обеспечивающая взаимодействие операторов и аналитиков (пользователей) с системой. Пользователи подключаются к узлу с помощью терминала с использованием протокола SSH-2 (Ylonen, T. The Secure Shell (SSH) Authentication Protocol. RFC 4252, 2006: электронный ресурс¹⁹) и программного обеспечения X WindowSystem (Scheifler, R.W. X Window System Protocol. X Consortium Standard. X Version 11, Release 7.7. Version 1.0. 2012: электронный ресурс²⁰). Эта служба предоставляет доступ пользователям к функционалу системы и архивным данным. Служба является интерфейсом для взаимодействия с полным набором модулей реализующих функционал системы. Служба является точкой финального тестирования программных реализаций модулей системы.

2.1.3. Служба веб-доступа

Служба обеспечивает доступ к результатам автоматической и пост-обработки, отражает текущее состояние работы системы на основе данных службы мониторинга. Служба является поставщиком оперативных каталогов землетрясений, измеренных параметров (ускорение, спектральные характеристики) движения грунта в результате сейсмических воздействий широкому кругу пользователей и потребителей.

2.1.4. Служба мониторинга

Служба ориентирована на наблюдение за работой системы. К числу наблюдаемых элементов относятся каналы связи, количество поступающей информации, результаты работы скриптов, количество терминальных пользователей, загрузка основных аппаратных ресурсов (объём оперативной памяти, нагрузка на центральный процессор, дисковое пространство), мониторинг доступности удалённых сейсмических узлов и другая служебная информация.

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

¹⁹ <http://tools.ietf.org/pdf/rfc4252>

²⁰ <http://www.x.org/releases/X11R7.7/doc/xproto/x11protocol.html>

- объединение в единую локальную сеть сейсмических станций до 250 удалённых узлов;
- прозрачное масштабирование при добавлении аппаратных компонент;
- дублирование программных компонент средствами виртуализации на базе системного программного обеспечения XEN версии не ниже 4.2 (The Main Source for Documentation: электронный ресурс²¹) для обеспечения отказоустойчивости.

Жизненный цикл данных показан на Рисунке 14.

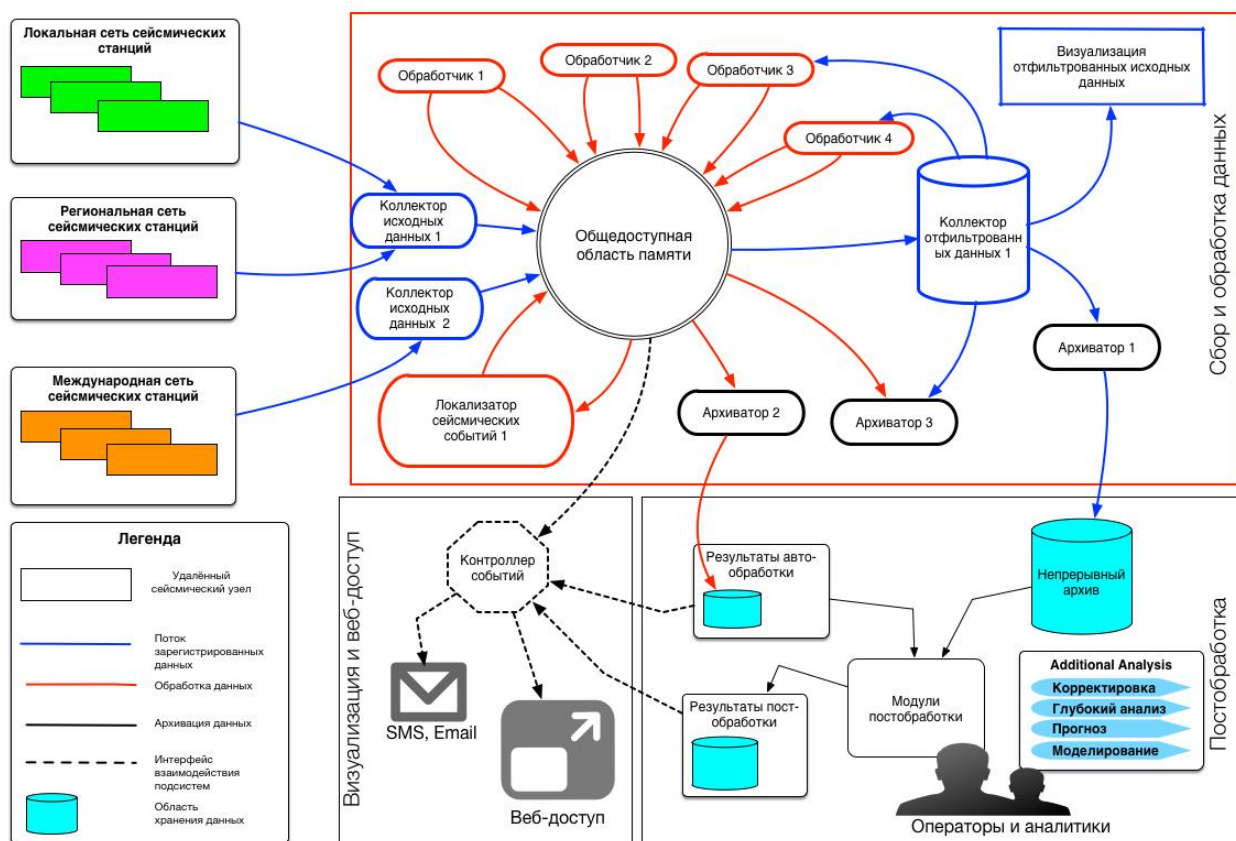


Рисунок 14. Жизненный цикл данных в системе.

В настоящее время на севере о. Сахалин функционирует локальная сеть, состоящая из 23 сейсмических станций (Рисунок 15). Каждая станция непрерывно регистрирует информацию о движении грунта, представляет собой удаленный сейсмический узел, в рамках концепции ВСС, и составляет часть единой системы сейсмического мониторинга.

²¹ <http://www.xenproject.org/help/wiki.htm>



Рисунок 15. Действующая сеть сейсмических станций на севере о. Сахалин. Зелёным цветом выделены станции ИМГиГ ДВО РАН, синим - ДВО РАН, чёрным - СФ ГС РАН, красным – IRIS GSN, жёлтым – Хоккайдского университета.

Локальные станции ИМГиГ ДВО РАН соединены в VPN сеть, построенную на базе технологий GPRS, XDSL и IPSEC. Узел имеет типовую организацию и состоит из отечественного регистратора и вспомогательного промышленного компьютера (ПК), который в режиме реального времени загружает волновой поток с регистратора, конвертирует и передаёт данные в центр обработки данных (ЦОД) по протоколу SEEDLINK. В качестве сейсмоприемников используются проверенные временем и разными условиями эксплуатации короткопериодные сейсмические датчики LE-3DLite (Lennartz Electronic, Германия) (Technical Specifications of a LE_3DLite MKII Seismometer, Lennartz_Electronic: электронный ресурс²²). Сейсмический датчик имеет собственную частоту 1 Гц, а его амплитудно-частотная характеристика на частотах выше

²² http://www.lennartz-electronic.de/PDF/Seismometers_print.pdf

собственной частоты колебаний задается постоянным коэффициентом – чувствительностью датчика. В качестве цифровых регистраторов используются отечественные сейсмические станции Дельта-03 (ООО “ЛогиС”, Россия) (Регистратор сейсмических сигналов «дельта-03»: электронный ресурс²³), которые зарекомендовали себя как надежные и относительно недорогие приборы (Гаврилов А.В., Коновалов А.В., Никифоров С.П. Результаты полевых и стационарных испытаний регистратора сейсмических сигналов «Дельта 03» // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 18-28). Шаг дискретизации на всех станциях составляет 125 отсчетов в секунду. Синхронизация времени происходит при помощи встроенного GPS приемника, а формирование опорной частоты часов реального времени осуществляется прецизионным, высокостабильным, термостатированным генератором. Авторами создано приложение, работающее под ОС Linux и реализующее протокол взаимодействия с регистратором Дельта-03, которое запускается по расписанию и загружает данные на жесткий диск ПК. Приложение ведет лог-файл, в котором сохраняется информация о загружаемых файлах и возникающих сбоях. Скорость загрузки данных с регистратора составляет около 200 Кбайт/с при прямом подключении станции к ПК. При такой скорости загрузки непрерывный файл с часовой записью по шести каналам и частотой сбора данных 125 Гц загружается за одну минуту. Для трехканальной записи это время соответствует 30 секундам. Для унификации формата регистрируемых данных разработанное приложение преобразует файлы, записанные станциями Дельта-03 в собственных форматах ADB и DDB, в универсальный MINISEED Steim1. Запись регистрируемых данных с сейсмической станции на ПК осуществляется в директорию, указанную в конфигурационном файле приложения config.cfg. Директорию с MINISEED архивом сканирует ПО Ringserver (IRIS Supported Software, ringserver: электронный ресурс²⁴), разработанное консорциумом IRIS, которое выполняет передачу данных в ЦОД по протоколу SEEDLINK.

Для повышения точности определений сейсмических событий в систему интегрирован сбор данных с региональных станций в режиме реального времени по протоколам SEEDLink, RTPD. Региональные станции СФ ГС РАН ОКН (г. Оха), TYV (п. Тымовское) представлены широкополосными станциями Guralp CMG6TD (датчик и регистратор), Guralp CMG3 (датчик) и GSR24 (регистратор). Региональные станции NKL (г. Николаевск-на-Амуре), UGL (г. Углегорск), A732 (г. Ванино) и LZR (м. Лазарев) представлены оборудованием REFTEK 151 (датчик) и RETEK 130 (регистратор).

²³ <http://www.logsys.ru/index.php?page=15>

²⁴ <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/ringserver/wiki>

Программно-аппаратное обеспечение ЦОД реализует основной функционал системы (Рисунок 14). Аппаратное обеспечение ЦОД составляет массив производительных x86 совместимых вычислительных машин, укомплектованных 48 центральными процессорами INTEL XEON. Общей ёмкость оперативной памяти 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, по мнению автора, представляют наиболее высокий функциональный уровень, обладают наилучшими инструментами и документацией для интеграции собственных программ, реализующих дополнительные методы анализа данных. Обработка данных выполняется в три этапа.

I этап. Данные с удалённых сейсмических узлов с помощью модулей `slink2ew` (контроллер исходных данных 1), `reftek2ew` (контроллер исходных данных 2) 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 в формате `TRACEBUFF2` проходят фильтрацию по заданным правилам с помощью модуля `wftimefilter` (обработчик 1), что позволяет отсеять дублирующие пакеты и пакеты с ошибочными временными метками в заголовке.

Модуль `pick_ew` (обработчик 2) выполняет 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). Модуль `pick_ew` позволяет выполнять обработку волнового потока по независимым для каждого канала сейсмической станции параметрам. В общем случае конфигурационный файл `pick_ew` состоит из более чем 24-х значений, учитывающих тип датчика, частоту дискретизации, параметры STA/LTA и шумовые проявления каждого канала.

Набор модулей `binder_ew` (обработчик 3), `local_mag` (обработчик 4), `eq_assemble` (локализатор сейсмических событий 1) на основе выявленных возможных времён вступлений волновых форм ассоциируют эту информации с возможными сейсмическими событиями, выполняют проверки с целью подтверждения факта возникновения сейсмического события, определяют локальную магнитуду, координаты и глубину гипоцентра землетрясения. Это наиболее сложный и ресурсоёмкий механизм системы. 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.

Набор модулей ew2mseed (архиватор 1), seisan_report (архиватор 2) и trig2disk (архиватор 3) выполняют архивацию волнового потока на диск в формате BUD/MiniSEED, обеспечивают интеграцию с системой SEISAN.

На II 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 получения наименьших ошибок, построение синтетических сейсмограмм, визуализация исходных данных и результатов определений. Для работы с данными был разработан 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.

III этап – публикация рассчитанных параметров об умеренных и сильных ($M_L \geq 3.5$) землетрясениях на специальном веб-портале. Разработанный автором контроллер событий отслеживает автоматические определения, результаты обработки с участием оператора для каждого уникального сейсмического события и передаёт информацию во внешнее веб-приложение (Рисунок 16). Контроллер событий реализован в виде скрипта BASH.

Архитектура была разработанная на базе существующего задела (Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В. Новая архитектура сбора, хранения и обработки сейсмологических данных // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С. 27-38) с применением уникальных решений.

M_L(3.6) 2015/6/5 19:48:55 UTC M

2015/6/6 05:48:55 SAKT

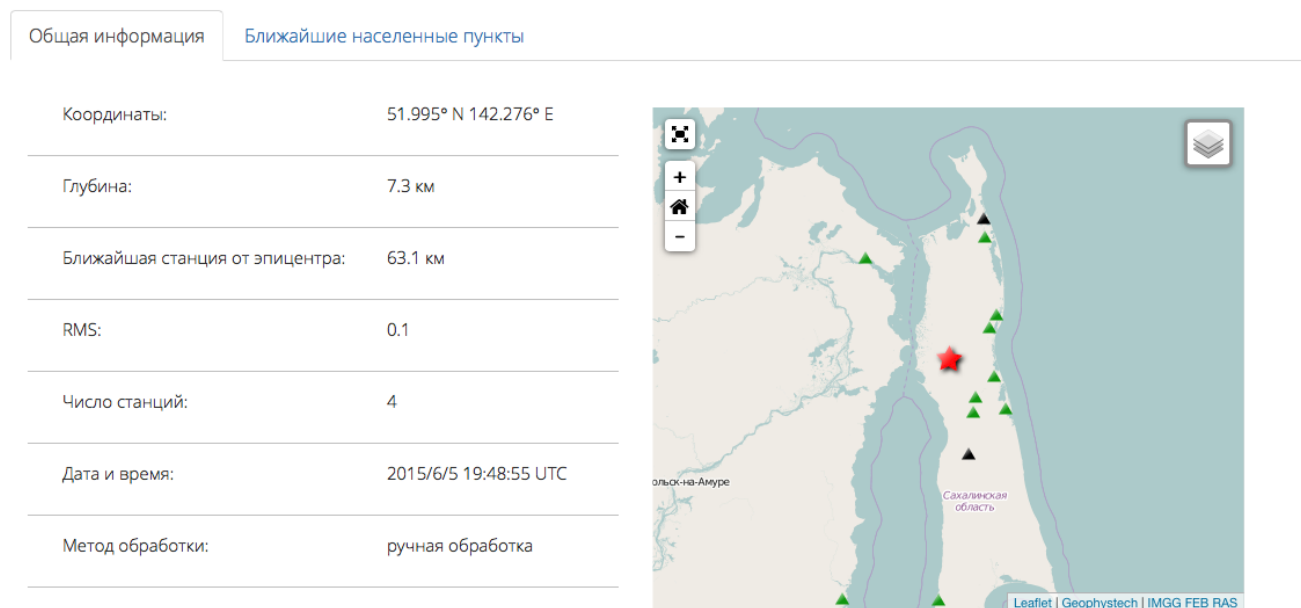


Рисунок 16. Действующий веб-интерфейс системы.

2.5. Выводы

Разработана концепция развития автоматизированной системы детальных сейсмологических наблюдений на севере о. Сахалин.

Разработаны 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. 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.

Глава 3. Анализ погрешностей созданной автоматизированной системы сейсмологических наблюдений

В настоящей 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.

3.1. Скоростная модель строения земной коры для Северного Сахалина.

Скоростная модель земной коры Северного Сахалина является определяющим параметром системы, кардинальным образом влияющим на точность определения координат и глубины гипоцентра. Изучение скоростей сейсмических волн и мощности слоев земной коры Северного Сахалина и прилегающих с востока и запада акваторий осуществлялось по материалам методов глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), преломленных волн (МПВ), общей глубинной точки (ОГТ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ). По величинам скоростей сейсмических волн и градиентам их изменения по горизонтали и вертикали в разрезах северного Сахалина можно выделить три крупных геологических комплекса: осадочный чехол, консолидированную кору и верхнюю мантию.

Осадочный чехол отличается наиболее значительными изменениями скоростей по вертикали от 1.6 км/с у поверхности до 5.4 км/с у его подошвы. Горизонтальные изменения скоростей здесь также имеют место, они минимальны при спокойном залегании отложений и возрастают в районах, где развиты крупные складчатые структуры и разломы. Мощность чехла в пределах рассматриваемого региона варьирует от 0 до 10 км. По материалам ГСЗ (Зверев С. М., Тулина Ю. В. (ред.). Глубинное сейсмическое зондирование земной коры Сахалино-Хоккайдо-Приморской зоны. Наука, 1974. 286 с.) скоростные характеристики верхней мантии и слоев консолидированной коры сохраняются практически постоянными на всей изучаемой территории, однако мощность коры изменяется в широких пределах – от 25 км во впадине Дерюгина до 35 км на Сахалине.

На картах мощности осадочного чехла (Красиков В.Н., Кононов В.Э., Пятаков Ю.В. Методика объемного моделирования по материалам сейсмогравиметрии с целью определения перспектив нефтегазоносности (на примере Северного Сахалина) // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах северо-западной окраины Тихого океана. Т. 1.

Южно-Сахалинск, 2000. С. 167-201; Никифоров В.М. [и др.]. Строение осадочной толщи Северного Сахалина (по данным МТЗ) // Тихоокеанская геология. 1987. № 3. С. 52-60.) можно наметить крупные антиклинальные и синклиналильные структуры субмеридионального простирания, состоящие из нескольких локальных складок вытянутых, как правило, согласно с общим простиранием структуры более высокого ранга (Алексейчик С. Н. [и др.]. Тектоника, история геологического развития и перспективы нефтегазоносности Сахалина //Труды Всесоюз. нефт. науч. исслед. геол.-развед. ин-та. 1963. №. 217. С. 265.).

На основании этих данных территория Северного Сахалина и прилегающих акваторий была разбита на зоны с близкими условиями регистрации сейсмических волн от землетрясений. В основу разбиения была положена мощность осадочного чехла, как фактора в наибольшей степени определяющего невязку времен вступления этих волн. В первом приближении строение чехла здесь можно описать чередованием трех субмеридиональных зон с мощностью осадков от 0 до 2 км, от 2 до 6 км, от 6 до 10 км (Рисунок 17).

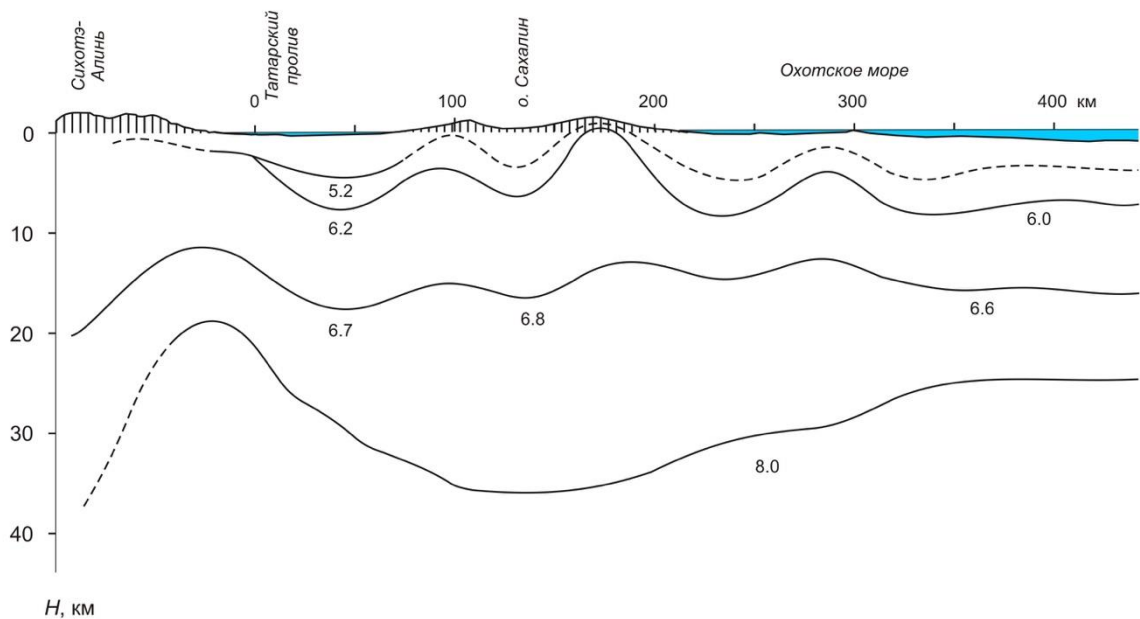


Рисунок 17. Сводный разрез земной коры (мыс Сюркум – впадина Дерюгина)

Изучением скоростных особенностей разрезов на суше (Дробот В.Д., Телегин А.Н. Изучение скоростных и волновых характеристик геологического разреза Северного Сахалина методом ВСП // Геологическая интерпретация сейсмических наблюдений в Дальневосточном регионе. Южно-Сахалинск, 1978. С. 79-84.) по материалам сейсмокаротажа скважин, МОВ, ОГТ и КМПВ было установлено, что интервальные (пластовые) скорости до глубины 3.0 км осредняются линейным законом:

$$V = V_0(1 + \beta H), \quad (16)$$

где $V_0 = 1.6-2.0$ км/с, градиент $\beta = 0.4-0.5$ 1/с, H – глубина в км.

Скоростные особенности разрезов на глубинах более 3 км изучены, в основном, работами КМПВ (Аргентов В.В., Биккенина С.К., Жигулев В.В. и др. Экспериментальные исследования методом преломленных волн на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. IV. Южно-Сахалинск, 1997. С. 90-118). Материалы этих работ представлены в виде системы годографов и сводных сейсмических разрезов, иллюстрирующих скоростное строение осадочного чехла и фундамента до глубин 10 км. В пределах чехла выделены 4 слоя с пластовыми скоростями сверху вниз: 2.0; 2.5; 3.9 и 4.5 км/с. Граничная скорость в фундаменте составляет 6.0-6.4 км/с. Так называемый базальтовый слой, выделяемый многочисленными исследованиями в низах коры, на рассматриваемой территории прослеживается эпизодически на глубинах 15-20 км. Он характеризуется скоростями сейсмических волн 6.5-6.7 км/с.

Данные о скоростях сейсмических волн и мощности отдельных слоев коры обобщены и представлены в таблице в виде осредненных скоростных разрезов земной коры для каждой из выделенных зон (Рисунок 18), имеющих субмеридиональную ориентировку. Поэтому, чтобы обеспечить одинаковые или хотя бы близкие условия приема колебаний от землетрясений, необходимо располагать сейсмические станции примерно на одной параллели или в пределах одной из выделенных зон. В плане доступности наиболее удобной из них является зона IV, поскольку вдоль нее проходит автомобильная трасса Тымовск-Оха. Мощность осадочного чехла в пределах этой зоны изменяется от 6 км у восточной и западной ее окраин до 4 км в ее центре, а на севере и юге, т.е. на полуострове Шмидта и отрогах Набильского хребта соответственно, уменьшается до нескольких сот метров. Такое изменение мощности приводит к вариациям времен прихода волн от землетрясений при различном положении пунктов наблюдений в этой зоне. Если для каждого из этих пунктов принять осредненную для данной зоны модель среды согласно скоростной колонки IV (Таблица 3), то априорная погрешность или разброс времен прихода волн будет составлять от +0.18 с до -0.27 с. При расположении станций в пределах каждой из других зон невязки могут быть еще меньше, так как изменение мощности осадков относительно средней в них меньше и не превышает 2 км.

эпицентра землетрясения. Комбинированные скоростные колонки ($IV \div I$, $IV \div II$, $IV \div III$ и $IV \div VII$) приведены в Таблице 3.

Зона I		Зона II		Зона III		Зона IV		Зона V		Зона VI	
ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V
0÷1.25	2.5	0÷1.25	2.5	0÷0.25	2.5	0÷1.25	2.5	0÷1.25	2.5	0÷2.5	2.5
1.25÷3.25	3.8	1.25÷2	3.8	2.5÷4.5	3.9	1.25÷2	3.9	1.25÷2.5	3.9	2.5÷4.5	3.9
3.25÷8	4.5	2÷4	4.5	4.5÷8	4.5	2÷4	4.5	2.5÷5	4.5	4.5÷8	4.5
8÷15	6.2	4÷12.5	6.2	8÷14.75	6.2	4÷15	6.0	5÷15	6.0	8÷15	6.0
15÷25	6.6	12.5÷29.5	6.6	14.75÷31	6.6	15÷35.5	6.6	15÷36	6.6	15÷35	6.6
25	8.0	29.5	8.0	31	8.0	35.5	8.0	36	8.0	35	8.0
Зона VII		Зона VIII		$IV \div III$		$IV \div II$		$IV \div I$		$IV \div VII$	
ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V	ΔH	V
0÷1.25	2.5	0÷0.75	2.5	0÷1.25	2.5	0÷1.25	2.5	0÷1.25	2.5	0÷1.25	2.5
1.25÷2	3.9	0.75÷1.75	3.9	1.25÷2.0	3.9	1.25÷2.0	3.9	1.25÷2.0	3.9	1.25÷2.0	3.9
2÷4	4.5	1.75÷4	4.5	2.0÷4.0	4.5	2.0÷4.0	4.5	2.0÷4.0	4.5	2.0÷4.0	4.5
4÷15	6.0	4÷17.5	6.0	4.0÷15	6.0	4.0÷15	6.0	4.0÷15	6.0	4.0÷15	6.0
15÷26.25	6.6	17.5÷35	6.6	15÷32	6.6	15÷30	6.6	15÷26	6.6	15÷27	6.6
26.25	8.0	35	8.0	32	8.0	30	8.0	26	8.0	27	8.0

Таблица 3. Значения скорости продольных сейсмических волн (V, км/с) и мощности отдельных слоев коры (ΔH , км) в виде осредненных скоростных разрезов земной коры для каждой из выделенных зон на Рисунке 18.

В настоящей работе для минимизации ошибок, связанных с субъективным фактором, использована процедура, оптимизирующая скоростную модель. Для этого, варьируя параметры скоростной модели (толщина слоя и скорость), было подготовлено несколько скоростных колонок, которые использовались для расчета времен пробега сейсмических волн. Исходные параметры скоростных моделей брались из Таблицы 3. Далее определялась среднеквадратичная невязка по результатам групповой обработки по нескольким станциям и событиям. Та модель, которая давала наименьшее среднеквадратичное значение невязки принималась за оптимальную. Результаты проведенного тестирования показали, что скоростная модель, соответствующая зоне IV из Таблицы 3 и Рисунка 18, дает минимальное значение невязки, а значит может быть рекомендована для ее использования в рутинной обработке. На основе этого была выполнена корректировка конфигурационных файлов программ обработки.

3.2. Анализ погрешностей определений и представительности данных

Для целей анализа погрешностей и определений анализируется каталог землетрясений севера о. Сахалин с магнитудой $M_L \geq 0$ с сентября 2006 г. по апрель 2015 г. За это время зарегистрировано более 1860 сейсмических событий, все события локализованы. Ниже приведены некоторые методические аспекты, которыми руководствовались авторы при составлении каталога землетрясений, а также представлен анализ результатов определений основных очаговых параметров. При определении координат гипоцентров по трем и более станциям из обработки удалялись времена пробега P- и S-волн, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях превышающих 150 км. Это позволило заметно уменьшить рассеяние гипоцентров, поэтому среднее квадратичное значение остаточной разности (8) не превышает 0.3 секунды. В качестве примера, демонстрирующего эффективность предлагаемого подхода, на Рисунке 19 изображено распределение среднее квадратичной величины невязки (RMS) в зависимости от глубины (H) при определении координат гипоцентра слабого мелкофокусного землетрясения ($M_L=2.6$), произошедшего 18 августа 2007 г.

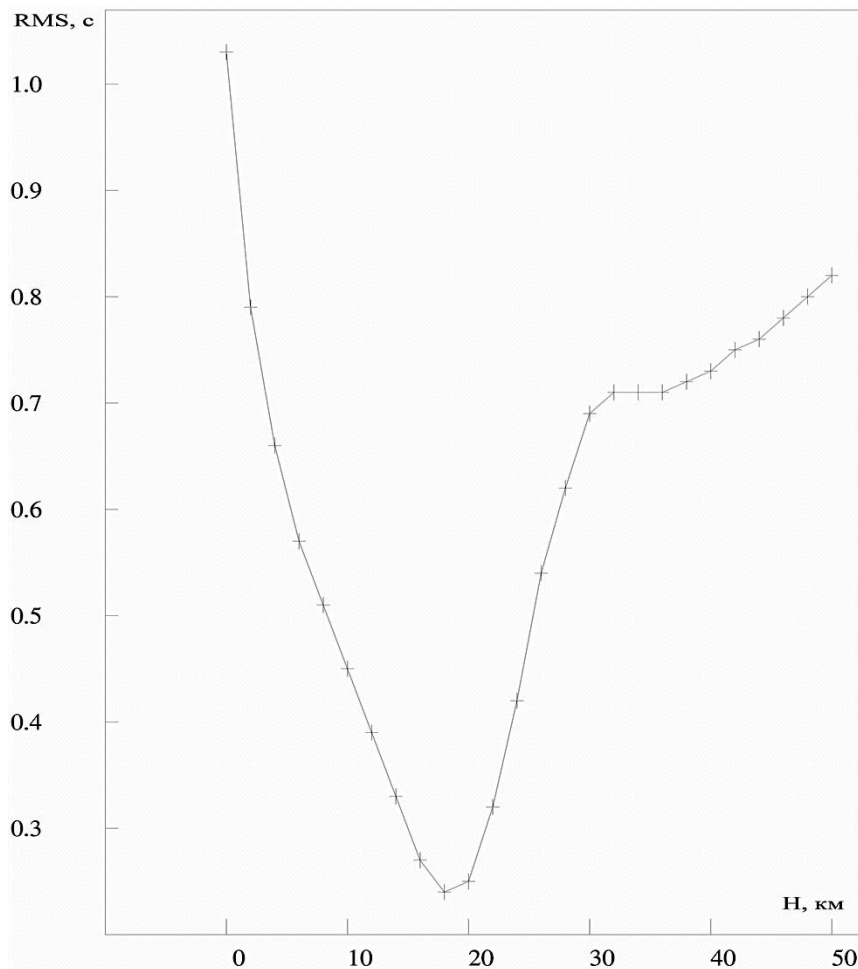


Рисунок 19. Распределение среднее квадратичной величины невязки (RMS) в зависимости от глубины очага (H) при определении координат гипоцентра слабого мелкофокусного землетрясения (18 августа 2007 г., $M_L=2.6$)

Как видно из Рисунка 19 значение глубины очага $H=18$ км характеризуется четким локальным минимумом функции RMS, принимающей значение чуть более 0.2 сек. При использовании времен пробега сейсмических волн на эпицентральных расстояниях, превышающих 150-200 км, функция RMS не достигает четкого минимума. Она «размазывается» по широкому диапазону глубин, что вызвано, по всей видимости, трехмерными вариациями скоростей сейсмических волн на больших удалениях от очага. Кроме того, при обработке каждого землетрясения производилось тестирование измеренных параметров при помощи графика Вадати, характеризующего среднее соотношение между скоростями P- и S-волн. Скорости S-волн рассчитывались по скорости P-волн из соотношения $V_P/V_S=1.8$. Записи данного землетрясения приведены на Рисунке 20.

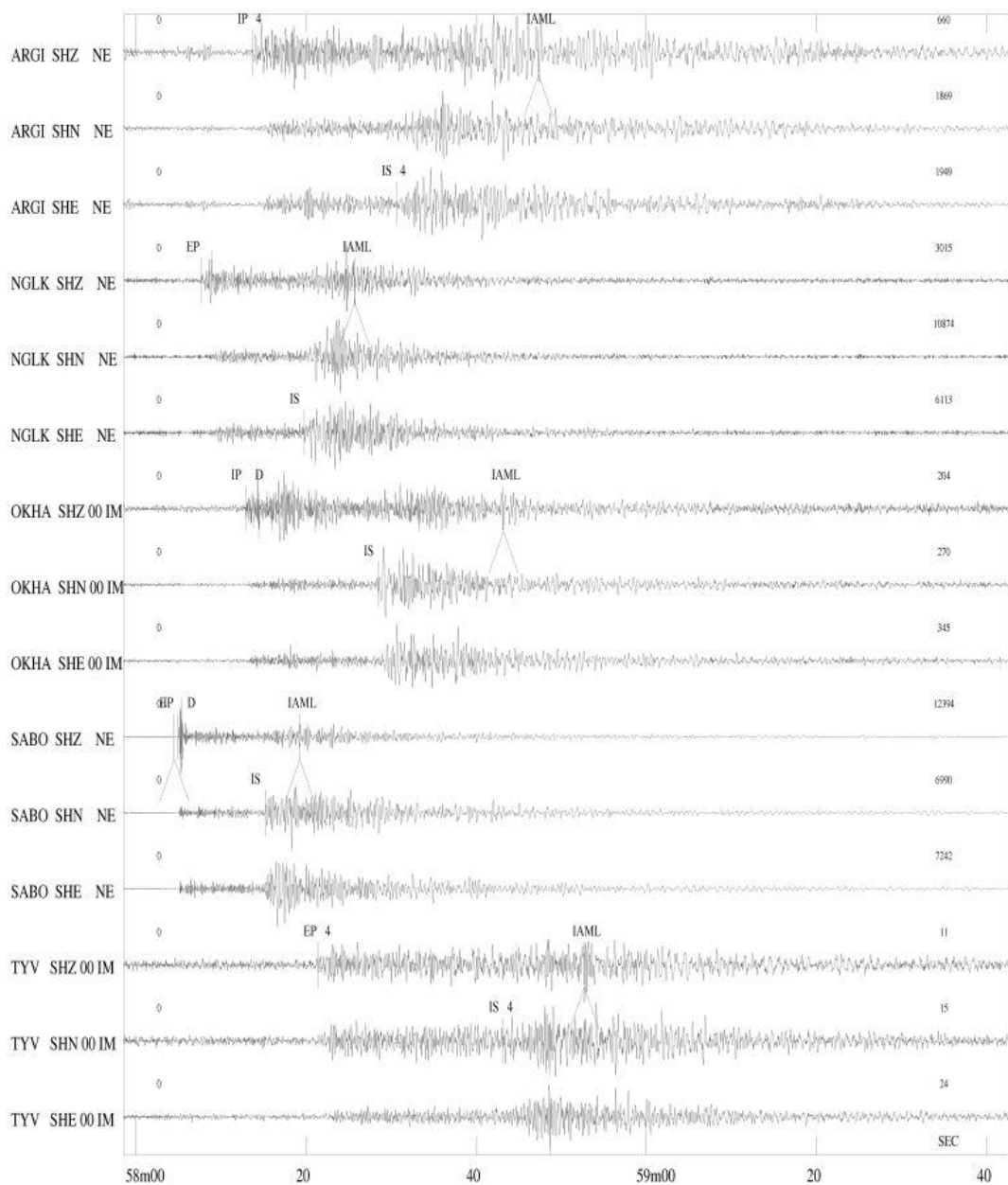


Рисунок 20. Пример визуализации фрагмента волновой формы слабого мелкофокусного землетрясения (18 августа 2007 г., $ML=2.6$), уверенного зарегистрированного несколькими

сейсмическими станциями. На рисунке отмечены времена и амплитуды первых вступлений сейсмических волн. Начало записи соответствует 17 ч 58 мин по Гринвичу. Применен 4-х полюсный фильтр Баттеруорта в полосе частот 1-15 Гц.

В качестве другого примера на Рисунке 21 изображен годограф объемных волн для сильного землетрясения ($M_w=5.8$), произошедшего в северо-западной части о. Сахалин 16 марта 2010 г. Измеренные времена пробега P- и S-волн от очага землетрясения до наблюдающих станций обозначены крестиками. Расчетные времена пробега P- и S-волн, построенные согласно базовой скоростной модели (Таблица 3, зона IV) и фиксированному значению глубины очага ($H=5$ км), показаны аппроксимирующими непрерывными линиями: нижняя линия соответствует первым вступлениям P-фазы, верхняя – первым вступлениям S-фазы. Видно, что времена пробега сейсмических волн, измеренные по нескольким сейсмическим станциям, в том числе отдаленным, лежат на одних аппроксимирующих линиях годографов, что в определенном смысле подтверждает высокую точность вычислений.

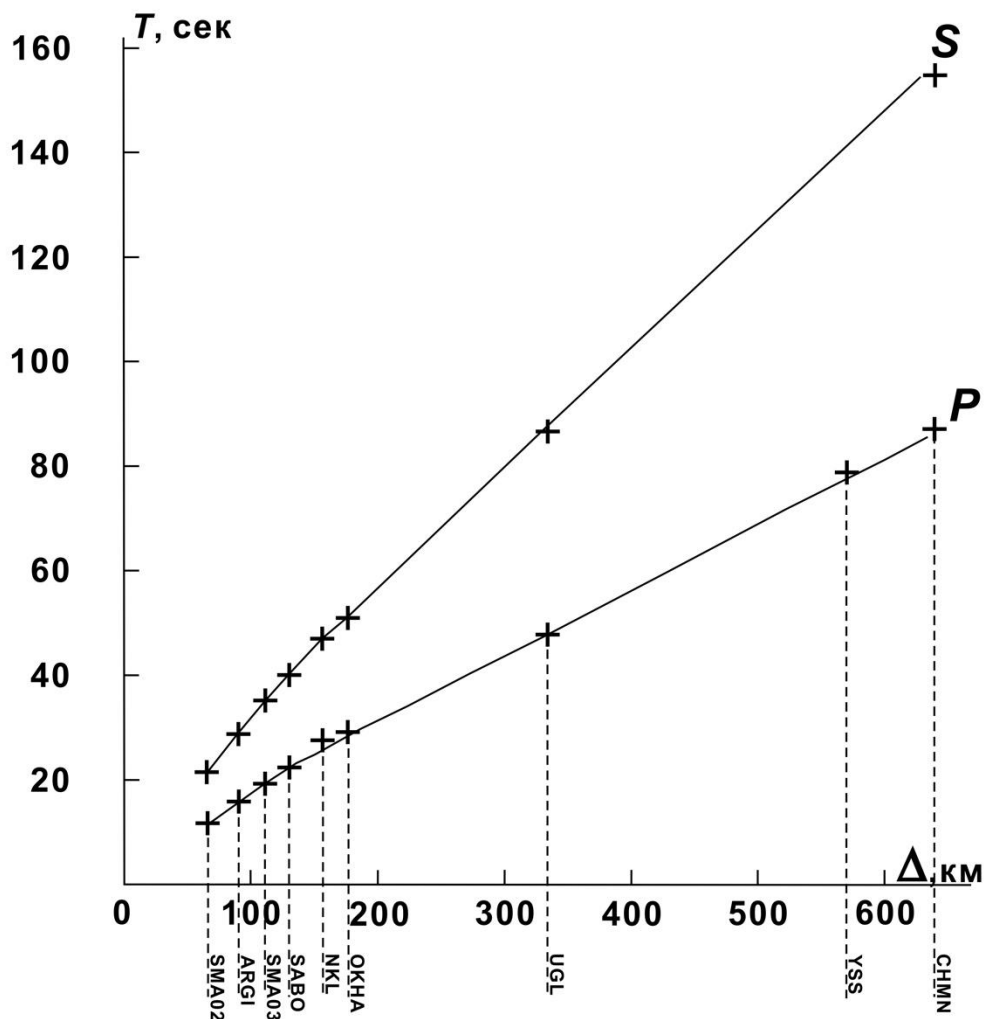


Рисунок 21. Годограф объемных волн, полученный при локализации очага сильного землетрясения (16 марта 2010 г., $MW=5.8$)

Распределение среднеквадратичной величины невязки (Рисунок 22, а) для рассматриваемого каталога землетрясений не превышает 0.4 с, а для 95% случаев не превышает 0.3 с, что согласуется с априорной оценкой, приведенной в одной из предыдущих глав. Более 75% очагов землетрясений локализованы по трем и более станциями (Рисунок 22, б). Брешь азимутального покрытия сетью наблюдений при локализации очага составляет, более 120 гр. (Рисунок 22, в), что очевидно связано с меридиональным расположением станций – вдоль острова (Рисунок 15). Около 40% от общего числа землетрясений соответствует брешу 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 22, б).

Следует отметить, что меридиональное расположение сети наблюдений осложняет локализацию землетрясений. Об этом свидетельствуют параметры рассеяния в определении координат гипоцентров, приведенные на Рисунке 23. 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, как, например, изображено на Рисунке 20, и, следовательно, такие события характеризуются схожими погрешностями определений, что и землетрясения с магнитудой $M_L \geq 3.0$. Поэтому авторы уделяют особое внимание к безотказной работе всей сети наблюдений для получения кондиционного каталога землетрясений.

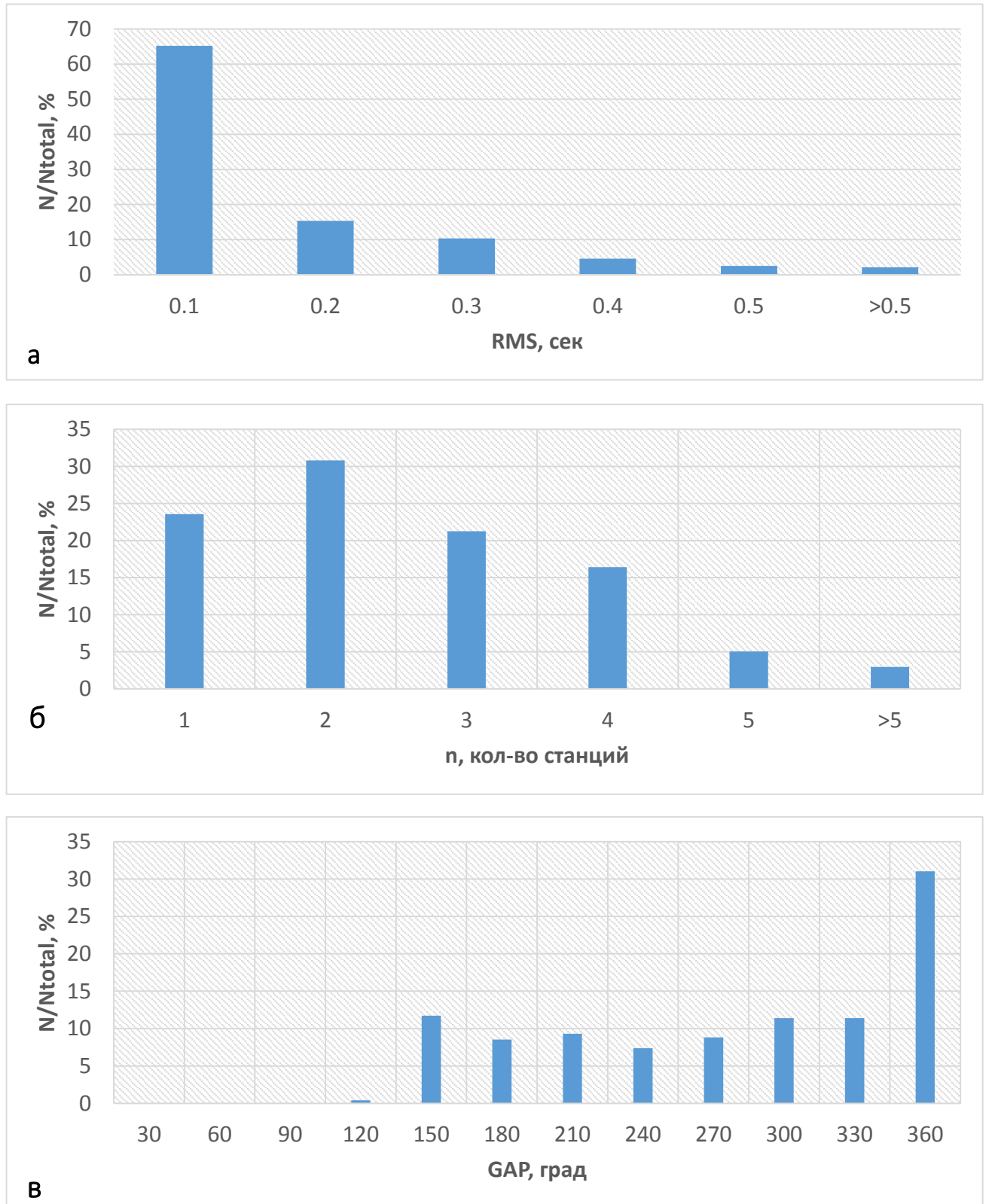


Рисунок 22. Гистограммы рассчитанных параметров: а – среднеквадратичная величина невязки (RMS); б – количество используемых станций (n); в – брешь азимутального покрытия сетью наблюдений при локализации очага (GAP).

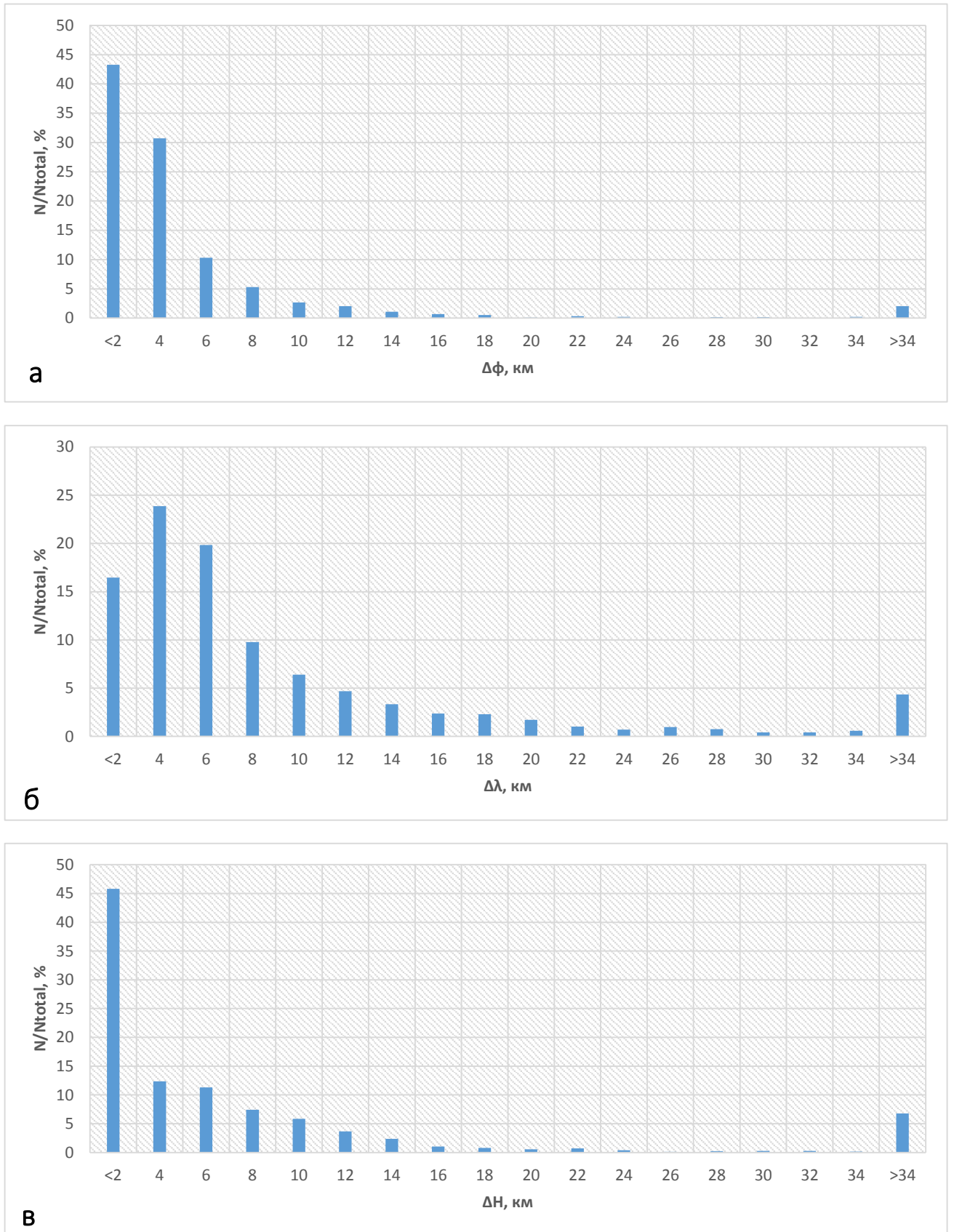


Рисунок 23. Распределение погрешностей определений; а – широты ($\Delta\phi$); б – долготы ($\Delta\lambda$); в – глубины (ΔH).

По данным каталога землетрясений севера о. Сахалин с сентября 2006 г. по апрель 2015 г. ($M_L \geq 0$) были построены плотностной и кумулятивный графики повторяемости (Рисунок 24). 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, землетрясения в этом диапазоне регистрируются сейсмической сетью не в полном объёме.

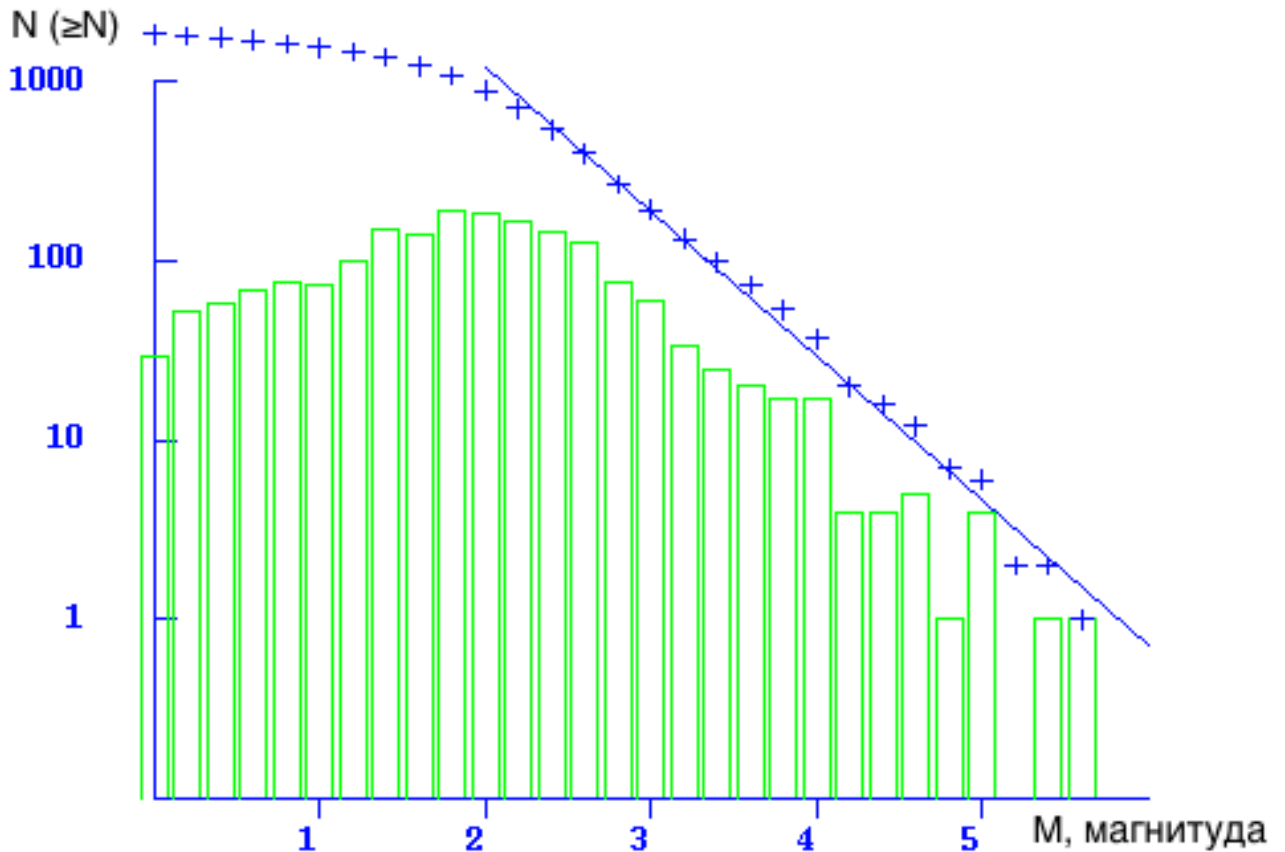


Рисунок 24. Кумулятивный график повторяемости Гутенберга-Рихтера и аппроксимирующее лог-линейное соотношение. Гистограмма отображает плотностное распределение повторяемости.

На основе анализа погрешностей в расчётах рассматриваемого каталога землетрясений определены регистрационные возможности действующей сети сейсмических станций (Рисунок 25). Для локации землетрясений в автоматическом режиме программ `binder_ew` и `eq_assemble` требуется, в качестве входных параметров, времена вступления Р-волн зарегистрированных на минимум четырёх сейсмических станциях. Таким образом, в рамках созданной системы, землетрясения с $M_L \geq 3$ в области, отмеченной изолиниями красного цвета, будут гарантированно зарегистрированы и обработаны автоматически.

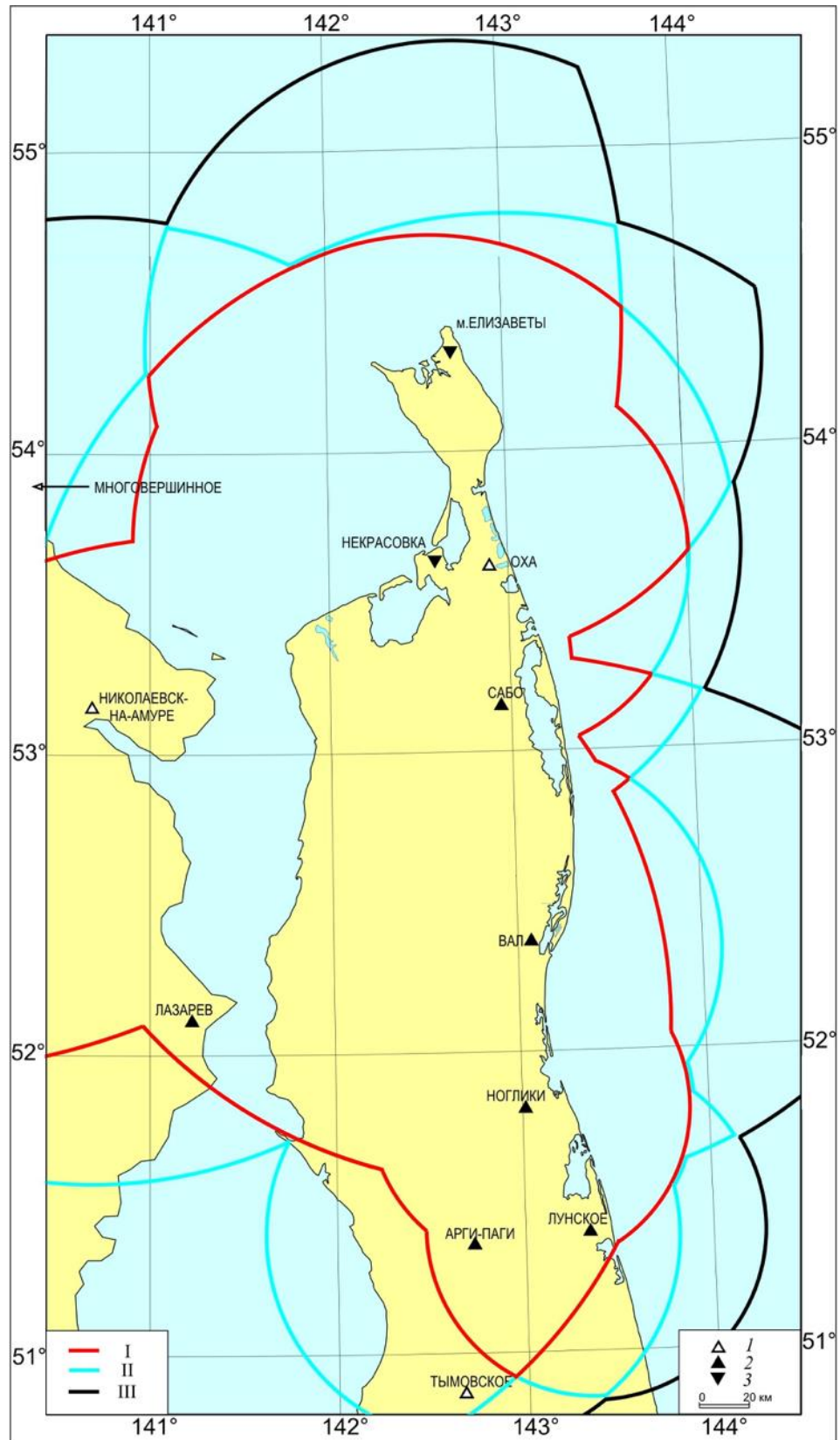


Рисунок 25. Карта регистрационных возможностей локальной сети сейсмических станций для $M_L \geq 3.0$ на севере о.Сахалин. 1 – станции СФ ГС РАН, 2 – станции ИМГиГ ДВО РАН, 3 – запланированные к установке станции, I – область уверенной регистрации для 4-х и более станций, II – область уверенной регистрации для 3-х станций, III – область уверенной регистрации для 2-х станций.

В случае с пост-обработкой минимальный порог регистрируемых землетрясений существенно ниже ($M_L \geq 0$), хотя и зависит от местоположения очага. Это связано с тем, что оператор имеет возможность вручную предоставить программам расчёта гипоцентра больше входных параметров (данные об азимуте на станцию, веса фаз, время $S-P$) что позволяет выполнить локализацию в случае, если землетрясение зарегистрировано только одной станцией.

3.3. Результаты автоматической обработки системы на примере роя землетрясений июня-июля 2014 г. в ГО «Ногликский»

После окончания стадии разработки и корректировки управляющих параметров, автоматический модуль комплексной автоматизированной системы мониторинга за естественной и наведённой сейсмичностью на севере о. Сахалин, в период с 01 февраля по 30 мая 2014 г., был протестирован в условиях будущей промышленной эксплуатации. За этот период были отлажены следующие ключевые функции системы: контроль обмена информацией между подсистемами процессинга и пост-процессинга, контроль целостности архивации непрерывных данных, контроль точности автоматических определений, контроль отказоустойчивости системы в целом. Всего, на этапе тестирования, в течение 120 дней, на выбранной территории (Рисунок 26), были проанализированы 37 землетрясений, в диапазоне локальных магнитуд от 2 до 5.

Каждое землетрясение анализировалось по следующему базовому алгоритму:

1. Проверка корректности и целостности поступивших цифровых данных.
2. Проверка корректности автоматического определения времени вступления P -волны на вертикальном канале. Анализ ложных срабатываний и пропусков «полезного» сигнала.
3. Корректность автоматической локации очага гипоцентра.

Анализ автоматически определённых параметров очага выполнялся на этапе постобработки, когда при участии оператора-аналитика использовался немодифицированный непрерывный архив зарегистрированных цифровых данных. Для каждого землетрясения оператор-аналитик отмечал времена вступления сейсмических волн, используя полный набор программ ПО SEISAN, и выполнял локализацию сейсмического события с помощью отлаженного набора конфигурационных файлов ПО SEISAN. Далее, были проведены сравнения автоматических и ручных определений, скорректированы соответствующие параметры конфигурационных файлов. Такой подход двойной обработки данных на этапе тестирования обеспечил приемлемый уровень оценки работы подсистемы автоматической обработки.

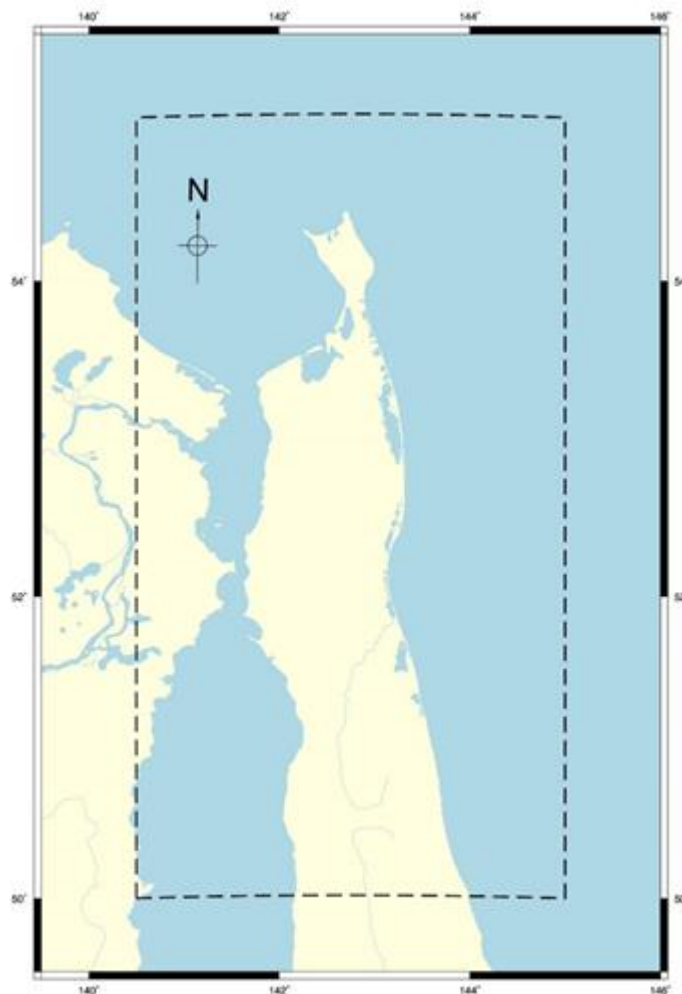


Рисунок 26. Выбранная территория для автоматических определений.

Следует отметить, что на севере о. Сахалин существует ряд факторов, которые непосредственно повлияли на конечную конфигурацию параметров автоматического определения и локации сейсмических событий.

А) Сеть сейсмических станций относительно разрежена, среднее расстояние между ближайшими станциями составляет около 50 км.

Б) Сеть станций, в силу географических особенностей, меридионально ориентирована.

Г) Некоторые станции установлены в местах с относительно высоким уровнем микросейсмического фона. Это обусловлено необходимостью размещения сеймопавильона вблизи телекоммуникационной инфраструктуры и источников постоянного электроснабжения.

Д) Для автоматической локации очага землетрясения необходимо как минимум четыре зарегистрированных вступления P -волны.

Исходя из текущей конфигурации сейсмической сети, с целью сведения к минимуму ложных срабатываний, для промышленной эксплуатации была подобрана конфигурация, которая обеспечивает автоматическую регистрацию землетрясений со следующими характеристиками:

1. Территория ограничена следующими географическими координатами:

- а) минимальная долгота (левая граница) 140.5° ВД;
- б) максимальная долгота (правая граница) 145.0° ВД;
- г) минимальная широта (нижняя граница) 50.0° СШ;
- д) максимальная широта (верхняя граница) 55.0° СШ.

2. Магнитуда землетрясения $M_L > 3$.

Комплексная автоматизированная система мониторинга за естественной и наведённой сейсмичностью на севере о. Сахалин была запущена в промышленную эксплуатацию 1 июня 2014 г. Первую апробацию автоматических определений система прошла в условиях серии землетрясений, произошедших в период с 27 июня по 07 июля 2014 г на севере о. Сахалин (Рисунок 27).

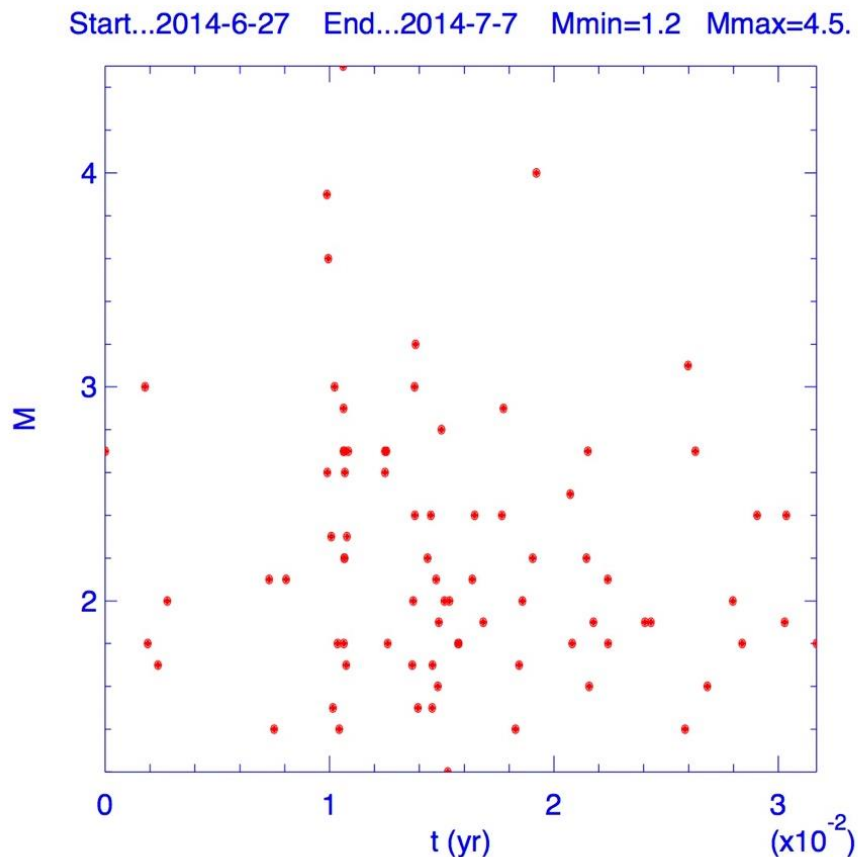


Рисунок 27. Серия землетрясений вблизи пгт. Ноглики 27 июня – 07 июля 2014 г

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 28, Рисунок 29).

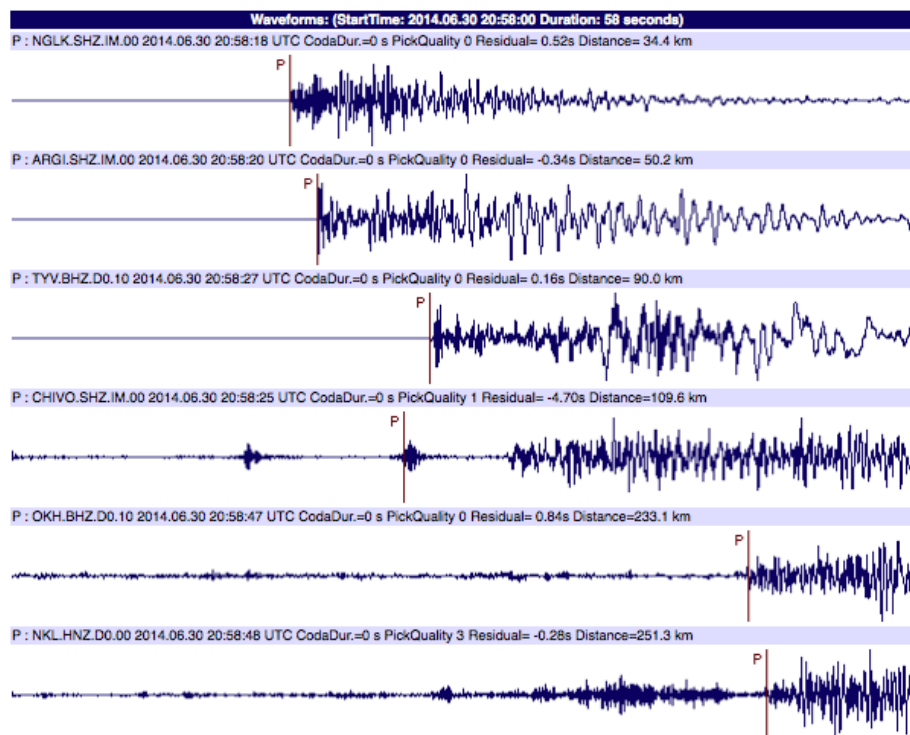


Рисунок 28. Автоматически определённые времена вступления P -волн для землетрясения с $M_L=4.5$

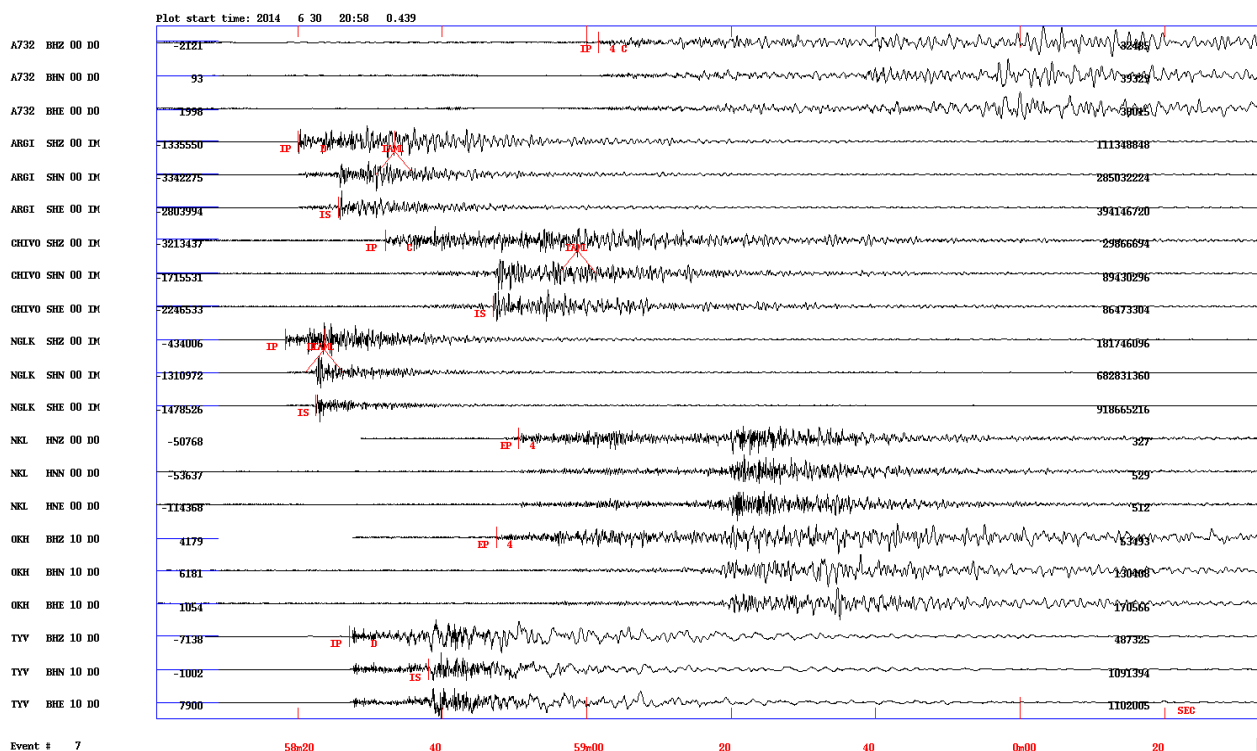


Рисунок 29. Корректировка автоматически определённых параметров на этапе постобработки.

Количество идентифицированных оператором землетрясений с $M_L > 2.5$ составило 22, из них автоматически зарегистрировано и локализовано 21 сейсмическое событие (Таблица 4).

Год	Месяц	День	Час	Минута	Секунда	Широта	Долгота	Глубина	RMS	M_L	Ошибка 1	Пропуск
2014	6	27	00	05	13.5	51.566	143.113	19.8	0.3	2.7	>0.01	НЕТ
2014	6	27	15	38	46.7	51.567	143.106	18.7	0.3	3.0	-	ДА
2014	6	30	14	42	29.0	51.566	143.103	20.8	0.3	3.9	>0.01	НЕТ
2014	6	30	14	48	12.6	51.563	143.108	19.3	0.3	2.6	0.02	НЕТ
2014	6	30	15	11	27.3	51.572	143.094	19.8	0.3	3.6	>0.01	НЕТ
2014	6	30	17	40	39.7	51.577	143.096	17.8	0.2	3.0	0.02	НЕТ
2014	6	30	20	58	12.8	51.574	143.090	17.5	0.1	4.5	>0.01	НЕТ
2014	6	30	21	06	12.4	51.565	143.086	19.7	0.3	2.9	0.01	НЕТ
2014	6	30	21	09	57.4	51.569	143.088	19.8	0.3	2.7	>0.01	НЕТ
2014	6	30	21	25	8.7	51.577	143.080	18.8	0.4	2.7	0.03	НЕТ
2014	6	30	21	37	43.4	51.575	143.083	19.9	0.4	2.6	0.4	НЕТ
2014	6	30	22	57	15.9	51.567	143.102	18.9	0.3	2.7	0.02	НЕТ
2014	6	30	22	57	15.8	51.571	143.100	20.5	0.3	2.7	0.01	НЕТ
2014	6	30	22	57	16.0	51.568	143.102	18.6	0.2	2.6	0.08	НЕТ
2014	6	30	23	25	13.4	51.562	143.107	19.1	0.3	2.7	0.06	НЕТ
2014	7	1	00	48	38.7	51.561	143.100	18.8	0.3	3.0	0.5	НЕТ
2014	7	1	11	21	37.5	51.571	143.106	18.2	0.3	2.8	0.03	НЕТ
2014	7	2	11	39	6.8	51.567	143.072	18.5	0.3	2.9	0.02	НЕТ
2014	7	3	00	26	54.8	51.586	143.093	19.2	0.1	4.0	>0.01	НЕТ
2014	7	3	13	38	9.7	51.579	143.073	18.7	0.4	2.5	0.02	НЕТ
2014	7	3	20	29	56.3	51.564	143.109	18.2	0.4	2.7	0.04	НЕТ
2014	7	5	14	27	36.2	51.589	143.077	15.0	0.1	2.7	0.01	НЕТ

Таблица 4. Анализ автоматической обработки землетрясений. Ошибка 1 – максимальное абсолютное значение ошибки ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$) в определении координат эпицентра в градусах в сравнении с пост-обработкой.

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. На примере рассмотренной серии землетрясений, из 22 событий было пропущено 1 землетрясение, что обусловлено, в первую очередь, временным выходом из строя двух сейсмических станций (были зарегистрированы проблемы на сотовой сети оператора связи), что является довольно редким случаем. В целом, ошибка ($\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$) в определении координат эпицентра при сопоставлении автоматически определённых параметров с уточнёнными значениями с участием оператора для большинства землетрясений составила менее 10 км.

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. Как уже отмечалось ранее, непрерывно регистрируемые и пополняемые данные о сейсмичности играют важную роль в своевременном выявлении активизации естественной и наведенной сейсмичности в условиях активной промышленной эксплуатации месторождений нефти и газа на севере острова.

3.4. Выводы

Опираясь на сейсмические исследования земной коры Северного Сахалина были подобраны оптимальные параметры скоростной модели для системы, определены регистрационные возможности локальной сети сейсмических станций.

На примере действующей сети наблюдений на севере о. Сахалин реализована полная автоматизация процедур сбора, передачи, хранения и рутинной обработки данных. В автоматическом режиме система уверенно регистрирует и определяет параметры очага землетрясения по четырем и более станциям для $M_L \geq 3$ и с наименьшим уровнем ошибок идентифицирует событие на цифровом канале для $M_L \geq 1$.

Обоснована точность определений параметров гипоцентров землетрясений ($M_L \geq 0$): погрешность в определениях широты ($\Delta\varphi$), 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 $M_L \geq 2$.

4. Современная сейсмическая обстановка ($M \geq 2$) Северного Сахалина и его восточного шельфа

12 июня 2005 г. в 4 ч 17 мин всемирного времени на северо-востоке о. Сахалин в окрестностях шельфового месторождения нефти и газа Пильтун-Астохское, промышленное освоение которого ведется с 1999 г., произошло сильнейшее в этом районе землетрясение с моментной магнитудой $M_w=5.6$. Собраны и проанализированы все имеющиеся инструментальные данные для построения объективной модели очага.

Впервые в отечественной сейсмологической практике удалось организовать непрерывные детальные наблюдения в районе месторождений нефти и газа до начала активной фазы промышленной эксплуатации и получить соответствующие кондиционные данные, характеризующие сейсмический процесс. Это, в частности, позволило проанализировать современную сейсмичность исследуемого района и выявить закономерности атфершоковых последовательностей землетрясений по результатам детальных сейсмологических наблюдений.

4.1. Историческая сейсмичность и активные геоструктуры региона

Северный Сахалин представляет собой полого-всхолмленную равнину с общим наклоном к северу с небольшими группами профильных возвышенностей, как Вагис-Джолокорская, Дагинская, Оссойско-Вальская, являющимися северным продолжением Западно-Сахалинских гор (Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 180 с.). В простирации горно-грядового рельефа превалирует линейно-субмеридиональное направление. Западнее Вагис-Джолокорской гряды отчетливо выражена межгорная депрессия, переходящая в прибрежную низменность, выклинивающуюся в сторону Амурского лимана и слегка раскрывающуюся в сторону пролива Невельского. Почти на всем севере острова геологические структуры простираются в северо-северо-западном направлении. Такие формы рельефа объясняются особенностями развития молодых мезозойско-кайнозойских формаций (Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области // М.: Наука, 1987. 95 с.).

Положение главных разрывных дислокаций острова – Западно-Сахалинского, Центрально-Сахалинского (Тымь-Поронайского), Срединно-Сахалинского, Хоккайдо-Сахалинского и Восточно-Сахалинского глубинных разломов – определяет простираение геологических структур вдоль западного и восточного побережий всего Сахалина (Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 180 с.; Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области // М.: Наука, 1987. 95 с.; Оскорбин Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск:

ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 6. С. 154-178; Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.).

Крупнейшую зону литосферного уровня представляет собой Западно-Сахалинский глубинный разлом (Рисунок 30), который протягивается на расстояние более 600 км вдоль восточного побережья Татарского пролива. С подвижками по сегменту Западно-Сахалинского разлома на севере острова связаны, по всей видимости, сильнейшие в этой зоне землетрясения 26 декабря 1906 г. ($M=6.0$) и 19 января 1907 г. ($M=6.5$). Фоновая сейсмичность разломной зоны проявляется практически на всем ее протяжении (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.).

С востока структуры западно-сахалинских возвышенностей ограничивают Центрально-Сахалинский глубинный разлом (Рисунок 30). Зона разлома представляет сложную полосу интенсивных складчатых и разрывных дислокаций. Сильнейшее землетрясение в пределах указанной зоны произошло 22 января 1909 г. Его локальная магнитуда составила $M=6.1$ (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.). С учетом точности определения очаговых параметров землетрясения в то время, данное событие может быть связано с подвижкой по Западно-Сахалинскому разлому.

Система Энгизпальских разломов, которые продолжают Центрально-Сахалинский разлом на север, оконтуривает западное и восточное крылья Вагис-Джолокорской гряды. Западно-Энгизпальский локальный разлом представляет собой взбросо-надвиг западного падения, иногда с отчетливой сдвиговой составляющей (Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области // М.: Наука, 1987. 95 с.; Оскорбин Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 6. С. 154-178; Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.). За период инструментальных наблюдений с 1905 по 2006 гг. в окрестностях этой зоны была зарегистрирована серия землетрясений с локальной магнитудой $M=5.0$ (2 и 7 мая 1962 г.) с последующими повторными событиями с $M \geq 4.0$. Землетрясение с $M=4.8$ произошло 14 марта 1980 г. (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.)

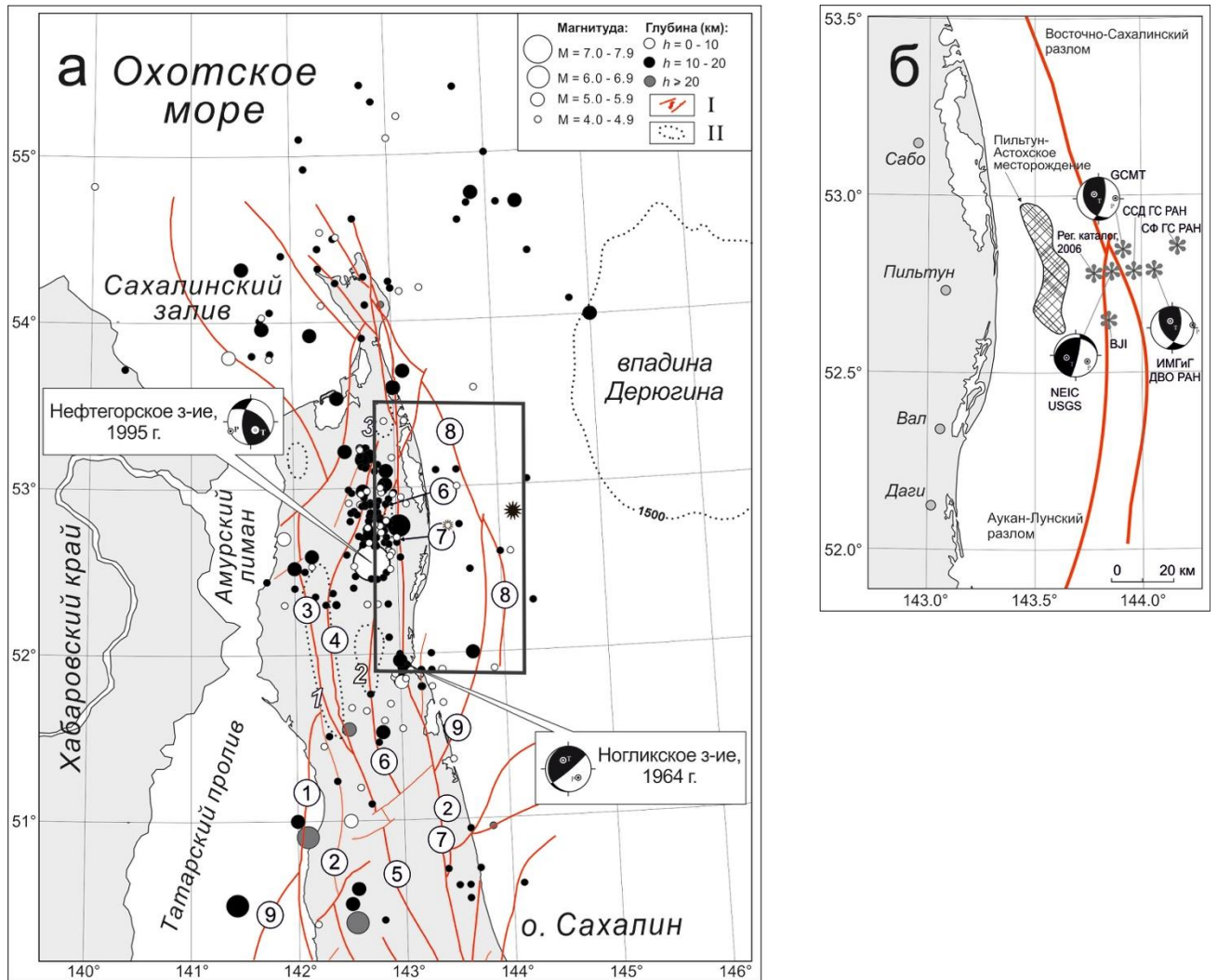


Рисунок 30. Карта Северного Сахалина. а – схема закартированных разломов и пространственное распределение эпицентров коровых землетрясений с $M \geq 4.0$ (с 1905 по 2006 гг.): I – активные разломы (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.); II – границы геологических структур. Зоны разломов (цифры в кружках на схеме): 1 – Западно-Сахалинский; 2-3 – Центрально-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Западно-Энгизпальский; 4-6 – Срединно-Сахалинский; 4 – Гыргыланьинский (Первомайский); 5 – Срединно-Сахалинский; 6 – Верхне-Пильтунский; 7 – Хоккайдо-Сахалинский; 8 – Восточно-Сахалинский; 9 – Аукан-Лунский. Геологические структуры (цифры курсивом на схеме): 1 – Вагис-Джолокорское поднятие; 2 – Дагинское поднятие; 3 – Оссойско-Вальское поднятие. Звездочками отмечены очаги Пильтунского землетрясения 2005 г. и последующих событий в 2005-2006 гг. в окрестностях месторождения Пильтун-Астохское. б – положение эпицентра и механизм очага (в проекции на нижнюю полусферу) Пильтунского землетрясения 2005 г. по данным сейсмологических агентств.

Почти через весь остров в виде дуги протягивается Срединно-Сахалинский глубинный разлом (Рисунок 30), который в пределах всех его фрагментов сопровождается системами

складчатых и разрывных дислокаций. Сегмент Срединно-Сахалинского глубинного разлома в центральной части Сахалина – Первомайский взбросо-надвиг – ограничивает с запада горстовые массивы Восточно-Сахалинских гор и полуострова Терпения. Локальная магнитуда сильнейшего в этом районе землетрясения (20 ноября 1992 г.) составила $M=5.0$. В северной части острова Срединно-Сахалинский мегасдвиг выражен в виде Дывыкского, Верхне-Пильтунского, Восточно-Эхабинского и Хейтонского активных разломов. За период инструментальных наблюдений с 1905 г. и до Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 г. ($M_w=7.0$) Срединно-Сахалинский глубинный разлом характеризовался относительно слабой сейсмичностью. Катастрофическое Нефтегорское землетрясение 1995 г. произошло в зоне Верхне-Пильтунского отрезка Срединно-Сахалинского глубинного сдвига. Очаг землетрясения вышел на дневную поверхность в виде системы сейсморазрывов общей протяженностью около 40 км. Сейсмодислокация Нефтегорского сейсморазрыва 1995 г. – правосторонний сдвиг вдоль субмеридиональной плоскости северо-восточного простирания (Рисунок 31), вспарывание происходило с юга на север (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). По результатам изучения строения сейсморазрывов в траншеях и радиоуглеродного датирования палеоразрывов, сильные сейсмические события в зоне Срединно-Сахалинского глубинного сдвига происходили 1000, 1400 и 1800 лет тому назад.

Вдоль восточного побережья Северного Сахалина проходят региональные разрывы Хоккайдо-Сахалинского глубинного разлома. Сложная система наложенных разрывных дислокаций – молодой отчетливой субмеридиональной диагональной и менее четкой продольной северо-северо-западной – пересекает ими же предопределяемую систему меридиональных хребтов Восточно-Сахалинских гор (Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области // М.: Наука, 1987. 95 с.). Сильнейшее в этой зоне землетрясение – Ногликское ($M=5.8$) – было зарегистрировано 2 октября 1964 г. (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.).

Восточно-Сахалинский глубинный разлом выделяется как субмеридиональная система разломов, преимущественно северо-северо-западной ориентации, протягивающаяся вдоль охотоморского побережья Сахалина и уходящая далее на юго-восток в сторону Южно-Охотской глубоководной впадины. Восточно-Сахалинская зона разломов характеризуется относительно слабой сейсмичностью. Несколько сильных землетрясений с локальной магнитудой $M\sim 5.5$ (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.) были зарегистрированы восточнее от п-ва Шмидта в окрестностях западного борта впадины Дерюгина.

На Рисунке 30 показано распределение эпицентров исторических землетрясений с $M \geq 4.0$ по данным регионального каталога землетрясений о. Сахалин с 1905 по 2005 гг. (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.), дополненного до сентября 2006 г. данными из (Каталог землетрясений Сахалина за 2005 год // Землетрясения Северной Евразии 2005. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 465-470) и оперативного каталога Сахалинского филиала Геофизической службы РАН (СФ ГС РАН). Из рисунка видно, что области повышенной сейсмичности приурочены к окрестностям вышеупомянутых крупнейших субмеридиональных разломов. Распределение сейсмичности на Северном Сахалине неравномерно: северо-восток острова значительно активнее, чем его северо-западная часть. Отчетливо прослеживаются зоны пониженной сейсмичности, в том числе вдоль сегментов Срединно-Сахалинского разлома с 50.0 по 51.5 гр. с.ш., Верхне-Пильтунского разлома (как продолжения Срединно-Сахалинского разлома) с 51.5 по 52.5 гр. с.ш., и Центрально-Сахалинского разлома с 51.5 по 52.3 гр. с.ш.

За последние несколько десятилетий в пределах Северного Сахалина и прилегающей акватории произошло более десятка землетрясений с $M \geq 5$, в том числе и Пильтунское землетрясение 12 июня 2005 г. ($M_w=5.6$).

4.2. Пространственное распределение сейсмичности ($M \geq 2$). Уточнение сейсмогеологической модели

В настоящей главе анализируется каталог местных землетрясений (869 событий) с локальной магнитудой $M_L \geq 2.0$, зарегистрированных с сентября 2006 г. по июнь 2014 г. За это время идентифицировано около 6505 сейсмических событий, из которых 2826 местных событий с $M_L \geq 1.0$ и 873 – с $M_L \geq 2.0$.

Выявлены следующие особенности пространственно-временного распределения коровой сейсмичности на севере о. Сахалин (Рисунок 31):

1. Незначительное число слабых и умеренных сейсмических событий регистрировалось на крайнем севере о. Сахалин и в акватории Сахалинского залива (53.5-54.5 гр. с.ш., 141.5-143.0 гр. в.д.). Данные землетрясения, по всей видимости, приурочены к зонам Западно-Шмидтовского, Лиманского и крайне-северных сегментов Хоккайдо-Сахалинского активных разломов. В зоне Восточно-Байкальского разлома локализован кластер, насчитывающий примерно полтора десятка слабых и умеренных сейсмических событий (53.4 гр. с.ш., 142.5 гр. в.д.).

2. Подавляющее число из трёхсот шестидесяти слабых и умеренных землетрясений, локализованных вблизи п. Сабо и северной части зал. Пильтун (52.5-53.2 гр. с.ш., 142.3-143.0 гр. в.д.), приурочены к зоне Гыргыланьинского и Верхне-Пильтунского активных разломов (Нефтегорский сейсморазрыв 1995 г.). Кроме того, в указанном районе было зарегистрировано,

но не локализовано, более 1200 микроземлетрясений. Очаги многочисленных сейсмических событий окаймляют с севера и юга Нефтегорский сейсморазрыв 1995 г., т.е. группируются в окрестности его вершин. Наблюдаемая закономерность пространственного распределения очагов землетрясений хорошо согласуется с современными представлениями о процессе хрупкого разрушения, согласно которым максимальные напряжения локализуются вблизи вершины трещины разрушения в нагруженных образцах. Такая необычная микросейсмическая активность в очаговой зоне катастрофического Нефтегорского землетрясения 1995 г. ($M_w=7.0$), спустя более 15 лет после его возникновения, может свидетельствовать о процессе залечивания геосреды (в зоне разлома) в условиях интенсивного субширотного сжатия региона (Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 42-28).

3. В зоне сочленения крайне-северных сегментов системы Западно-Энгизпальских субмеридиональных разрывов и Восточно-Байкальского активного разлома зарегистрирована слабая сейсмическая активность.

4. В зоне северных сегментов Центрально-Сахалинского активного разлома (системы Западно-Энгизпальских субмеридиональных разрывов) 16 марта 2010 г. в 09 ч 44 мин по Гринвичу в верховьях рек Уанга и Погиби произошло землетрясение с локальной магнитудой $M=5.7$ (далее Уангское землетрясение 2010 г.). Уангское землетрясение 2010 г. является сильнейшим на западном побережье Северного Сахалина за период инструментальных наблюдений в регионе, проводимых с 1905 г. Район данного землетрясения соответствует географическим координатам (Рисунок 33): 52.0-52.3 гр. с.ш., 140.0-142.2 гр. в.д. До 2010 г. данный район соответствовал области пониженной сейсмичности.

Событие 16 марта 2010 г. сопровождалось афтершоковыми последовательностями землетрясений. За две недели с момента главного события произошло около 130 афтершоков с $M \geq 2.0$. Наибольшей силы афтершок с $M=4.8$ был зарегистрирован спустя трое суток после главного события. Очаги афтершоков и главного события были локализованы на глубинах 5-10 км, где, по-видимому, и происходило накопление упругих деформаций, обусловленных общим региональным сжатием зоны разлома.

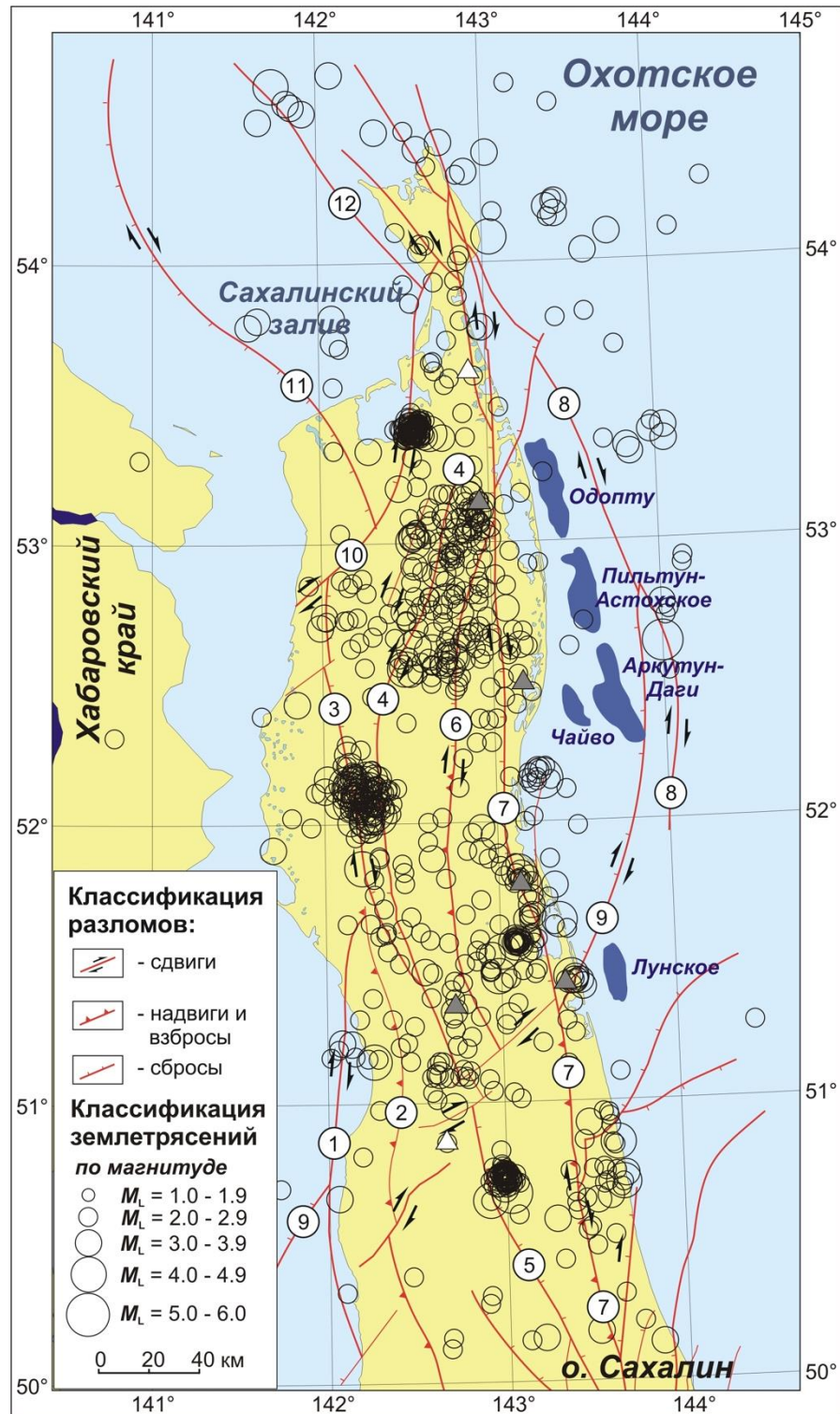


Рисунок 31. Пространственное распределение эпицентров коровых землетрясений с $M_L \geq 2.0$, зарегистрированных с сентября 2006 г. по июнь 2014 г. Список закартированных разломов (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.): 1 – Западно-Сахалинский; 2 – 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.

Коэффициент спадания сейсмической активности по графику Омори (1.5) указывал на быстрое затухание сейсмического процесса. Афтершоки с $M \geq 4.0$ произошли в течение первых трех суток. Отмечалось также аномально низкое значение наклона кумулятивного графика повторяемости Гутенберга-Рихтера (0.5), что соответствовало дефициту слабых землетрясений в очаговой зоне (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).

Следует отметить, что высокая вероятность возникновения в этом районе повторных землетрясений, упомянутая в (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), была впоследствии подтверждена реализацией сейсмических событий 9 июля и 2 сентября 2010 г. с $M=5.1$ и $M=4.6$ соответственно. Кроме того, с апреля 2010 г. по июнь 2011 г. в районе очаговой зоны Уангского землетрясения было локализовано около полусотни афтершоков с $M_L \geq 2.0$.

Уангское землетрясение 2010 г. с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия, что в целом хорошо согласуется с современными представлениями о характере деформирования Северного Сахалина (Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 42-28). Направление простирания одной из главных плоскостей сейсморазрыва достаточно уверенно согласуется с ориентацией системы Энгизпальских меридиональных разрывов Центрально-Сахалинского глубинного разлома и картиной пространственного распределения афтершоков (Рисунок 32). Это позволило сделать вывод, что разрыв в очаге произошел по плоскости, ориентированной субмеридионально. Протяженность области афтершоков составила приблизительно 30 км (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).

5. Возникновению Уангского землетрясения 2010 г. предшествовало повышение сейсмической активности в районе п. Мгачи на северо-западном побережье острова, в зоне сближения Центрально-Сахалинской и Западно-Сахалинской зон активных разломов. Самое сильное событие в этом районе было зарегистрировано 24 февраля 2010 г., его локальная магнитуда составила $M=4.2$, координаты эпицентра – 51.151 гр. с.ш., 142.236 гр. в.д. (Рисунок 33).

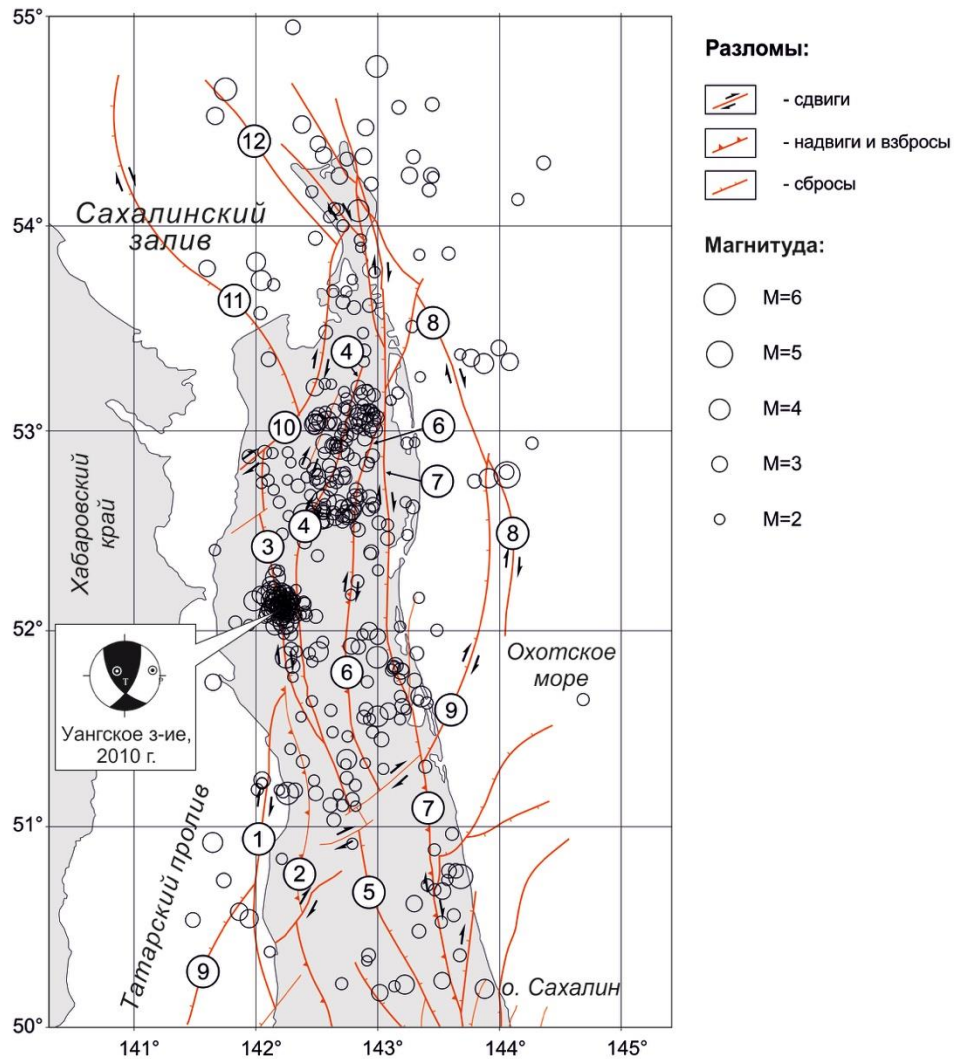


Рисунок 32. Пространственное распределение эпицентров коровых землетрясений с $M_L \geq 2.0$, локализованных с сентября 2006 г. по июнь 2011 г.

6. Отметим современную сейсмическую активность в широкой зоне острова и прилегающей акватории, куда входят сегменты Западно-Сахалинского, Центрально-Сахалинского, Гыргыланьинского, Срединно-Сахалинского и Хоккайдо-Сахалинского активных разломов, с 51.0 по 52.0 гр. с.ш. Кроме того, в пределах этой зоны было зарегистрировано, но не локализовано, несколько сотен микроземлетрясений. Основная часть локализованных землетрясений из этого района (Хоккайдо-Сахалинского активного разлома) приурочена к афтершковой зоне Ногликского землетрясения 1964 г., а также несколько севернее её.

7. 12 декабря 2011 г. в 09 ч 28 мин по Гринвичу, приблизительно в 30 км к юго-востоку от п.г.т. Тымовское, произошло мелкофокусное ($h = 5.1$ км) землетрясение с магнитудой $M_L 5.4$. Тымовское землетрясение 2011 г. сопровождалось большим количеством афтершоков. За две недели после главного события было зарегистрировано более 600 повторных событий из эпицентральной зоны, из них 159 с $M_L \geq 1.0$. Около 70 афтершоков удалось локализовать по двум и более станциям. За первые сутки было зарегистрировано около половины афтершоков от их

общего числа за две недели. Наибольшей силы афтершок с магнитудой M_L 3.9 был зарегистрирован спустя 1 час. Близкое по силе землетрясение с магнитудой M_L 3.7 произошло спустя 6 минут после главного события.

Тымовское землетрясение 12 декабря 2011 г. и его афтершоки (Рисунок 31) приурочены к одному из сегментов Срединно-Сахалинского глубинного разлома. В пределах Центрального Сахалина сегмент Срединно-Сахалинского глубинного разлома – Первомайский взбросо-надвиг – ограничивает с запада горстовые массивы Восточно-Сахалинских гор и полуострова Терпения. Срединно-Сахалинский разлом в пределах всех его фрагментов сопровождается системами складчатых и разрывных (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.).

Глубина гипоцентра составила 5.1 км. Схожие результаты были получены международными и региональными сейсмологическими агентствами. Таким образом, мы можем предварительно заключить, что очаг Тымовского землетрясения 12 декабря 2011 г. и его афтершоки залегают в земной коре на глубине 5-10 км, где, по-видимому, и происходит накопление упругих деформации, обусловленных региональным сжатием зоны разлома.

В границах сейсмоактивной зоны (Оскорбин Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 6. С. 154-178.), к которой относится Тымовское землетрясение 2011 г., за прошедшие годы инструментальных наблюдений на Сахалине (с 1905 г.) землетрясения с магнитудой $M > 6.0$ известны не были. Эпицентр землетрясения 1906 г. с M 6.0 расположен в 70 км западнее эпицентра рассматриваемого землетрясения.

8. Южнее 51.0 гр. с.ш. основная часть локализуемых сейсмических событий помимо очаговой зоны Тымовского землетрясения 2011 г., приурочено к зоне Хоккайдо-Сахалинского и Западно-Сахалинского активных разломов.

9. 21 октября 2012 г. в 11 ч 57 мин по Гринвичу приблизительно в 30 км к западу от г. Оха зарегистрировано умеренное сейсмическое событие с магнитудой $M_L=4.8$. Координаты эпицентра составили $53.405^\circ N$, $142.551^\circ E$, глубина очага – 10.9 км. Данное событие, являющееся сильнейшим за отчетный период, сопровождалось интенсивной афтершоковой активностью – за первые двое суток локализовано 56 сейсмических событий с магнитудой $M_L \geq 1.0$. Общее количество локализованных в афтершоковой зоне землетрясений до конца 2012 г. составило 105 сейсмических событий. Магнитуды сильнейших афтершоков, произошедших в первые сутки после главного события, составили M_L 3.9 и M_L 3.7. Указанные события приурочены, по всей

видимости, к зоне Восточно-Байкальского разлома (Рисунок 31). Отметим, что в данном районе за час до главного события было зарегистрировано микро-землетрясение с магнитудой M_L 1.2.

10. В пределах северо-восточного шельфа с 52.5 по 55.0 гр. с.ш., в зоне Восточно-Сахалинского глубинного разлома (немного восточнее осевой линии разлома, изображенной на Рисунке 31, вдоль простирания его основных структур были локализованы очаги слабых и умеренных землетрясений. Это подтверждает современную активность данной геологической структуры, протяженность которой составляет приблизительно 250-300 км (Рисунок 33). Её природа будет рассмотрена ниже.

На расстоянии около 20 км и чуть более к востоку от восточной границы месторождения нефти и газа «Пильтун-Астохское», в зоне сочленения Восточно-Сахалинского и Аукан-Лунского разломов, было локализовано пять землетрясений. Самые сильные события в этой зоне произошли 22 августа 2009 г. и 5 марта 2010 г., их локальные магнитуды составили $M_L=5.0$ и $M_L=3.7$ соответственно (Рисунок 31). Очаги рассматриваемых землетрясений приурочены к району афтершоковой зоны Пильтунского землетрясения 2005 г, их глубина составила 10-20 км. Из Рисунка 33 видно, что эллипсы ошибок «Пильтунской» группы землетрясений не пересекаются с контурами соответствующего нефтегазоконденсатного месторождения, за исключением одного слабого события, которое было локализовано всего по двум станциям.

Еще одна группа из семи землетрясений расположена приблизительно в 70 км к северо-западу от «Пильтунской» группы землетрясений и в 20 км от восточной границы месторождения нефти и газа «Одопту». Расстояние до месторождения «Пильтун-Астохское» составляет около 50 км (Рисунок 33). Локальные магнитуды самых сильных событий из этой группы 17 ноября 2007 г. и 22 ноября 2007 г. составили $M_L=3.5$ и $M_L=3.8$ соответственно. Отметим, что промышленное производство нефти и газа на месторождении Одопту началось в сентябре 2010 г., поэтому указанные сейсмические события никак не могут быть связаны с производственной деятельностью на месторождении, и в то же время несут важную информацию о долговременном сейсмическом фоне в указанном районе.

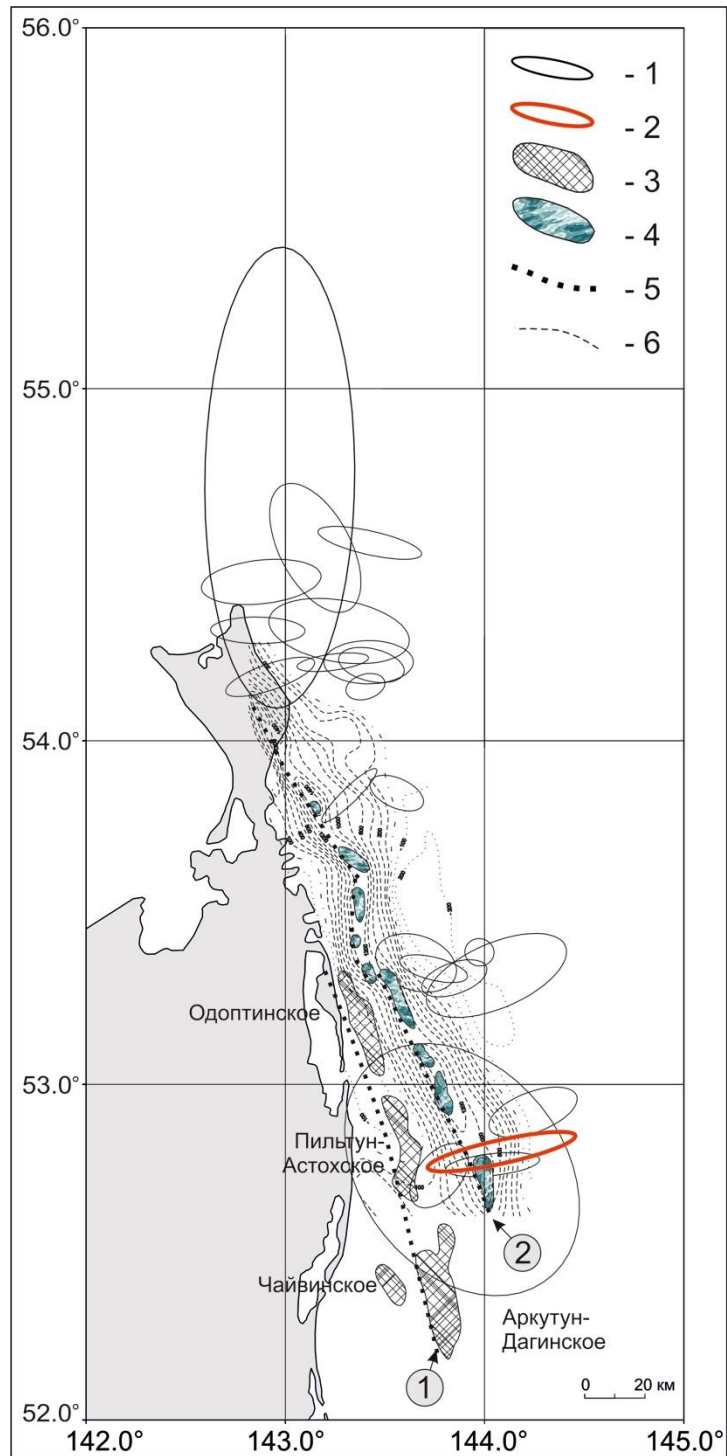


Рисунок 33. Карта аномального магнитного поля и основных структурных элементов северо-восточного шельфа о. Сахалин.

1 – эллипсы ошибок в определении координат эпицентров землетрясений в 2006-2011 гг.; 2 – эллипс ошибок в определении координат эпицентра Пильгунского землетрясения 2005 г.; 3 – месторождения вдоль Одоптинской антиклинальной зоны; 4 – контур антиклинальных поднятий вдоль Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны; 5 – разломы: 1 – Западно-Одоптинский, 2 – Восточно-Сахалинский; 6 – изодинамы.

Еще одна группа из семи землетрясений расположена приблизительно в 70 км к северо-западу от «Пильтунской» группы землетрясений и в 20 км от восточной границы месторождения нефти и газа «Одопту». Расстояние до месторождения «Пильтун-Астохское» составляет около 50 км (Рисунок 33). Локальные магнитуды самых сильных событий из этой группы 17 ноября 2007 г. и 22 ноября 2007 г. составили $M_L=3.5$ и $M_L=3.8$ соответственно. Отметим, что промышленное производство нефти и газа на месторождении Одопту началось в сентябре 2010 г., поэтому указанные сейсмические события никак не могут быть связаны с производственной деятельностью на месторождении, и в то же время несут важную информацию о долговременном сейсмическом фоне в указанном районе.

Ещё одна группа из десяти землетрясений локализована в шельфовой зоне у вершины сегмента разлома, оперяющего Хоккайдо-Сахалинский активный разлом, приблизительно в 20 км к юго-западу от месторождения «Чайво»; магнитуда сильнейшего события из этой группы 19 февраля 2014 г. составила $M_L=5.0$.

11. В районе приблизительно в 20 км к югу от п.г.т. Ноглики, локализована компактная группа сейсмических событий. Данная сейсмичность имеет роевый характер; магнитуда сильнейшего землетрясения, зарегистрированного 30 июня 2014 г. в 18 часов 45 минут по Гринвичу, составила $M_L 4.5$, координаты эпицентра $51.567^\circ N$, $143.088^\circ E$, глубина очага 20.2 км. Общее число локализованных событий в рое составило 131 землетрясение. Кроме того в данном районе зарегистрировано, но не локализовано около десятка микро-землетрясений с магнитудами не превышающими $M_L 1.8$.

12. Наряду с областями повышенной сейсмичности, на карте эпицентров землетрясений (Рисунок 31) прослеживаются области пониженной сейсмичности. Одна из таких областей, прослеживаемая также на карте эпицентров исторических землетрясений (Рисунок 30, а), соответствует району Верхне-Пильтунского разлома с 52.0 по 52.5 гр. с.ш, то есть протяженность данной зоны составляет около 50 км. Обращает на себя внимание тот факт, что вокруг именно этой зоны локализованы очаги крупных землетрясений (Ногликского 1964 г., Нефтегорского 1995 г., Пильтунского 2005 г., Уангского 2010 г. Тымовского 2011 г. и Охинского 2012 г.) и их сильнейших афтершоков. Возможно, это является признаком готовящегося сильного землетрясения.

В остальном сейсмичность характеризуется рассеянным распределением очагов землетрясений по координатам эпицентров.

Таким образом, области повышенной сейсмичности приурочены к сейсмогенным зонам сильных землетрясений (Ногликского 1964 г., Нефтегорского 1995 г., Пильтунского 2005 г., Уангского 2010 г. Тымовского 2011 г. и Охинского 2012 г.). Четко прослеживается

пространственное группирование землетрясений вдоль главных разрывных дислокаций. Интервал группирования составляет приблизительно 50-70 км. В некоторых случаях группирование землетрясений более рассеянное. Вместе с тем, можно выделить области пониженной сейсмичности, которые прослеживаются также на карте эпицентров исторических землетрясений. Возможно, эти области являются зонами готовящихся сильных землетрясений.

4.3. Пильтунское землетрясение 2005 г. ($M_w=5.6$). Параметры очага, характер напряженного состояния и геологическая обстановка

12 июня 2005 г. на северо-восточном шельфе о. Сахалин произошло коровое землетрясение с моментной магнитудой $M_w=5.6$ (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). Так как ближайший населенный пункт, в котором отмечены максимальные сотрясения (4-5 баллов по шкале MSK-64), – п. Пильтун, то предложено данное событие называть Пильтунским. Несколько землетрясений, близких по магнитуде к $M=5.5$ ранее уже были зарегистрированы на северо-восточном шельфе (восточнее от п-ва Шмидта), возникновение этих событий обычно связывали с современной тектонической активностью западного борта впадины Дерюгина. Пильтунское землетрясение 2005 г. представляет особый интерес, т.к. оно произошло значительно южнее упомянутых событий и на текущий момент является самым сильным в этой шельфовой зоне острова за всю историю сейсмологических наблюдений (с 1905 г. по настоящее время).

Сейсмическое событие 12 июня 2005 г. было уверенно зарегистрировано многими региональными сейсмическими станциями СФ ГС РАН, а также телесеизмическими станциями Объединенного института сейсмологических исследований (IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology: электронный ресурс²⁵) и широкополосными станциями японского Национального исследовательского института наук о Земле и предотвращения катастрофических явлений (NIED – National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention: электронный ресурс²⁶). Были собраны и проанализированы все имеющиеся инструментальные и макросейсмические данные для построения объективной модели очага землетрясения. В Таблице 5 приведены очаговые параметры (время в очаге, координаты эпицентра, глубина очага и магнитуда) Пильтунского землетрясения 2005 г. по данным региональных и зарубежных сейсмологических агентств, а также определенные в настоящей работе.

²⁵ <http://www.iris.edu>

²⁶ <http://www.bosai.go.jp>

№	Источник	Время в очаге t_0 , ч:мин:с	Эпицентр		Глубина очага h , км	Магнитуд a
			φ , гр. с.ш.	λ , гр. в.д.		
1	(Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.)	04:17:10.3	52.78	143.74	14*	MLH=5.7
2	ССД ГС РАН	04:17:11.1	52.79	143.97	10	mb=6.1
3	NEIC USGS	04:17:13.5	52.79	143.87	10	Mw=5.6
4	GCMТ	04:17:13.5	52.85	143.92	15	Mw=5.5
5	ВЛ	04:17:12.4	52.65	143.85	14	mb=5.4
6	ИМГиГ ДВО РАН	04:17:10.1 (04:17:13.9)	52.80 (52.77)	144.07 (143.96)	15 (14)*	
7	СФ ГС РАН (Каталог землетрясений Сахалина за 2005 год // Землетрясения Северной Евразии 2005. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 465-470)	04:17:08.1	52.86	144.18	14*	MLH=5.5

Таблица 5. Очаговые параметры Пильтунского землетрясения 2005 г.

Принятые сокращения: MLH – магнитуда по поверхностной волне Релея, mb – магнитуда по объемной волне P, Mw – моментная магнитуда; ССД ГС РАН – Служба срочных донесений Геофизической службы РАН, Обнинск, Россия; NEIC USGS – National Earthquake Information Center, United States Geological Survey, США; GCMТ – The Global Centroid-Moment-Tensor Project; JMA – Japan Meteorological Agency, Япония; ВЛ – China Earthquake Networks Center, Institute of Geophysics, Китай; ИМГиГ ДВО РАН – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия; СФ ГС РАН – Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, Южно-Сахалинск, Россия; () – результаты определений по методу гипоинверсии с одновременным использованием средней модели строения Земли IASP91 и локального сейсмического разреза; * – фиксированное значение.

Параметры очага. Эпицентр землетрясения был локализован по методу инверсии времён пробега сейсмических волн (программа Нуросcenter, Раздел 2.3. настоящей работы) с использованием как средней модели строения Земли IASP91, так и локального сейсмического разреза (Раздел 2.2 настоящей работы).

В первом случае привлекались данные разных типов сейсмических волн с четырех близких региональных станций, расположенных на севере о. Сахалин (ОКН, ТУУ, UGL) и

материковой части Дальневосточного региона (NKL). Использовался только локальный сейсмический разрез. Глубина очага, так же как и эпицентр землетрясения были оценены одновременно. Для корректировки отношения скоростей P- и S-волн и независимой оценки времени в очаге, производилось дополнительное тестирование измеренных параметров при помощи графика Вадати. Начальное положение очага задавалось исходя из априорных знаний о произошедшем землетрясении. В совокупности это позволило добиться высокой точности пространственной привязки очага землетрясения, несмотря на небольшое количество исходных данных. Координаты эпицентра составили 52.80 гр. с.ш., 144.07 гр. в.д. (Таблица 5, № 6). Погрешности определений координат эпицентра в виде эллипса ошибок представлены на Рисунок 33. Таким образом, определение координат эпицентра Пильтунского землетрясения 2005 г. в программе Nurocenter с использованием локального сейсмического разреза позволяет корректно сравнивать полученные оценки с результатами детальных сейсмологических наблюдений, проводимых на севере о. Сахалин с 2006 г. в рамках единой системы наблюдений (Таблица 4).

Во втором случае привлекались данные 25 региональных и телесеизмических станций (27 сейсмических фаз) с одновременным использованием средней модели строения Земли IASP91 и локального сейсмического разреза. Глубина очага фиксировалась ($h=14$ км).

Региональный каталог землетрясений о. Сахалин за 1905-2005 гг. (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.) является результатом кропотливой работы над сейсмологическим материалом специалистов из СФ ГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН. В нем опубликованы параметры землетрясений, полученные по комплексу программ МПП (магнитуда, глубина, положение эпицентра) (Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока) // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР (методические работы ЕССН). М.: Наука, 1989. С. 32-51.) – базового для СФ ГС РАН. Для землетрясений во второй половине 2005 г. параметры, вошедшие в региональный каталог (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.), определялись во многом оперативно и в условиях дефицита исходной информации, поэтому расхождения этих решений (в основном в пределах точности локализации) с данными других источников являются закономерными, но не критичными. Для анализа очаговых параметров Пильтунского землетрясения 2005 г., полученных по материалам региональных наблюдений, более корректно использовать данные из опубликованного в 2011 г. каталога землетрясений о.

Сахалин за 2005 г. (Таблица 5, № 7) (Каталог землетрясений Сахалина за 2005 год // Землетрясения Северной Евразии 2005. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 465-470).

Таким образом, результаты определения координат эпицентра Пильтунского землетрясения 2005 г. совпали между собой в пределах точности локализации, в том числе и с результатами определений региональных и международных сейсмологических агентств (Таблица 5).

Глубина очага исследуемого землетрясения была определена по фазам pP и sP , отраженным от свободной поверхности вблизи эпицентра, с использованием таблиц Л.Н. Поплавской для эпицентральных расстояний $\Delta \approx 1-14^\circ$ (Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.) и Н.В. Кондорской – для $\Delta \geq 15^\circ$ (Сейсмологические таблицы. М.: ИФЗ АН СССР, 1962. С. 75-80.) и в среднем составила $h=14 \pm 3$ км. Всего было задействовано 23 глубинных фазы (Таблица 5).

Независимая проверка полученного результата была выполнена с использованием методики многоканального кепстрального анализа для автоматизированного выделения сейсмических фаз pP в условиях зашумленной записи (Коновалов А.В., Иващенко А.И. Многоканальный анализ кепстров для определения глубины очага мелкофокусного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 55-64). Метод использует кепстральный анализ для выделения эхоимпульсов на сейсмограмме опорной станции, а затем накопление индивидуальных кепстров по группе близко расположенных станций с последующей статистической оценкой значимости выделяемых эхосигналов. На Рисунке 34 представлен результат такой комплексной обработки по группе станций на юге о. Сахалин. На нём можно четко обозначить пик, соответствующий 4.5 ± 0.2 с, превышающий 99.9% уровень значимости. Это время соответствует разности времен пробега P - и pP -фаз. Отношение сигнал-шум достаточно хорошее. Как видно из Таблицы 6, разность времен пробега P - и pP -фаз, «прочитанная» по сейсмограммам цифровых сейсмических станций на юге острова, хорошо совпадает с результатом автоматизированной оценки, что подтверждает высокую точность определения глубины очага.

Станция, код	$\Delta, ^\circ$	$i-P,$ с	$hpP-P,$ км	$hsP-P,$ км	Станция, код	$\Delta, ^\circ$	$i-P,$ с	$hpP-P,$ км	$hsP-P,$ км
ОКН	1.0	4.2	12		ЕКМР	6.5	4.5	12	
OSM*	5.6	4.6	12				7.8		17
KRS*	6.2	5.0	15		YUK	8.9	6.5		13
OJD*	5.8	5.2	15		YASR	9.5	6.1		14

MLK*	6.0	5.4	16		ZEA	9.9	5.7		15
LSN*	6.1	4.2	11		NKL	1.9	4.0	10	
KLN*	6.0	4.9	15				8.0		20
YBL*	5.7	4.0	10		YSS	5.9	4.4	12	
TYV	2.0	4.3	11						18
		7.8		13	SKR	7.9	4.5	14	
UGL	3.8	5.0	15		BMKR	9.0	6.7		13
		7.5		16					
GRNR	5.0	4.0	10						

Таблица 6. Определение глубины очага Пильтунского землетрясения 2005 г. по глубинным фазам. * – автономные цифровые сейсмические станции СФ ГС РАН на юге о. Сахалин.

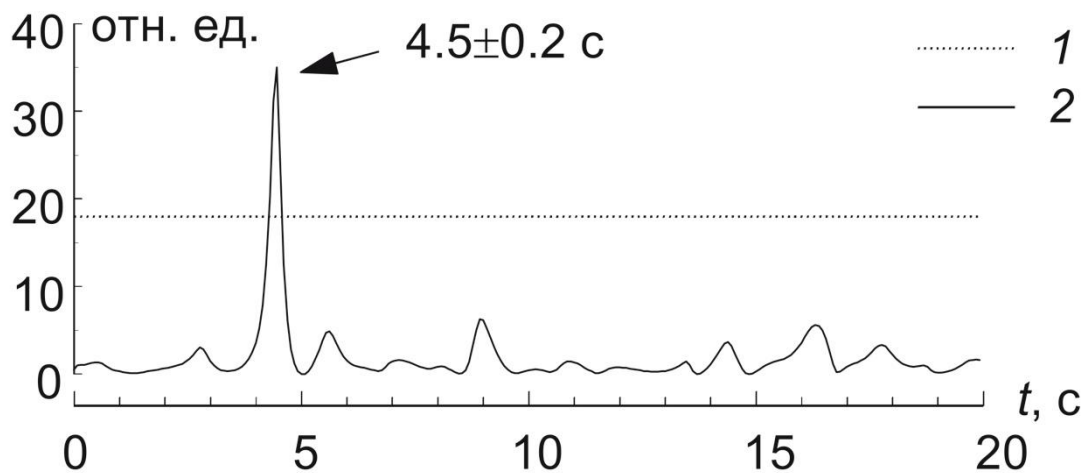


Рисунок 34. Результат автоматизированного выделения глубинной pP-фазы относительно времени вступления P-волны по записям локальной группы автономных цифровых сейсмических станций на юге о. Сахалин: 1 – 99.9% уровень значимости; 2 – обработанный кепстр.

Глубина гипоцентра, оцененная в программе Нуросcenter с использованием локального сейсмического разреза, составила 15 км (Таблица 5, № 6). Схожие результаты были получены международными сейсмологическими агентствами (Таблица 7). Таким образом, мы можем уверенно заключить, что очаг Пильтунского землетрясения 2005 г. залегает в земной коре на глубине 10-15 км.

Характер напряженного состояния. Механизм очага исследуемого землетрясения был определен в работе (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) при помощи программы FOCMEC (Рисунок

35) (Snoke J.A., Munsey J.W., Teague A.C. et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data // Earthquake Notes. 1984. V. 55 No. 3. P. 15; Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Апробация вычислительной программы FOCMEC для определения фокальных механизмов землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. №3. С. 102-117), интегрированной в комплекс сейсмологических программ SEISAN. Оно взято за основу для последующего анализа. В расчетах использовались инструментальные данные региональной сети сейсмических станций СФ ГС РАН, глобальной сейсмографической сети станций IRIS и японской широкополосной сети станций NIED.

Всего задействовано 26 знаков четких вступлений первых движений Р-волны, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. Для расчета углов выхода сейсмических волн из очага использовались средняя модель строения Земли IASP91 и локальный сейсмический разрез. При шаге поиска по сетке 5 градусов расчет выдал 12 возможных непротиворечивых вариантов решения механизма очага. Оценки рассеяния в ориентации осей главных действующих напряжений Т, Р и N для найденных решений составили в среднем ± 10 градусов. Параметры найденного решения приведены в Таблица 7 (№ 3).

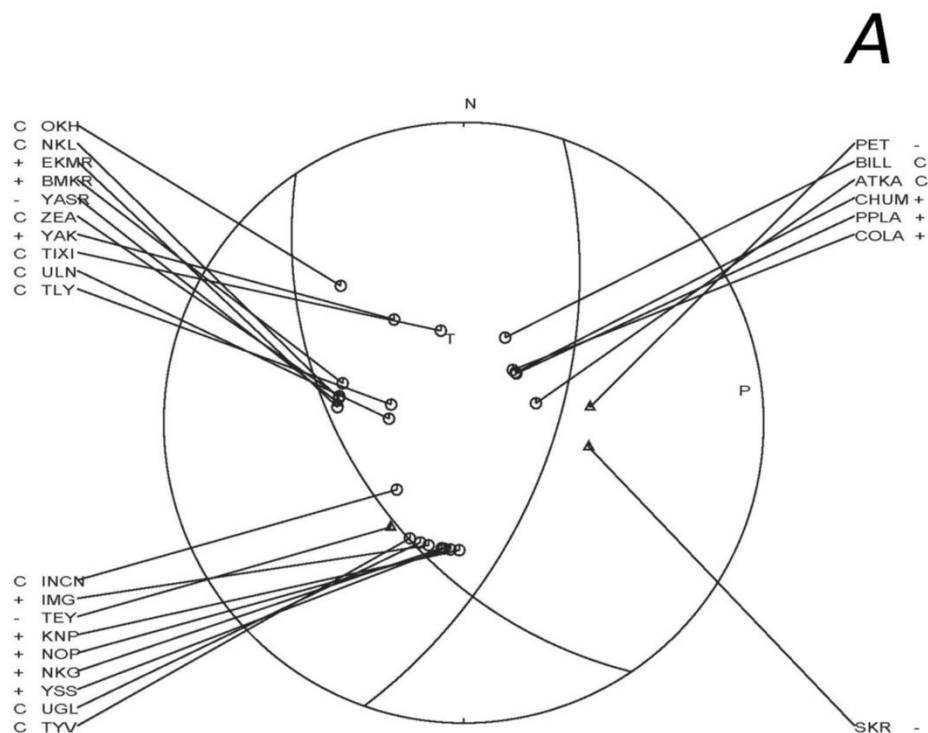


Рисунок 35. Решение механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. (Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16

марта 2010 года ($M_w=5.8$) на северо-западе о. Сахалин // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 37-49) в программе FOCMEC (в проекции на нижнюю полусферу), где О – станции с зарегистрированными волнами сжатия, Δ – станции с зарегистрированными волнами разряжения. На выносках обозначены коды станций с соответствующими полярностями относительно первых вступлений Р-волны.

№	Источник	NP1			NP2		
		Простираание Strike	Падение Dip	Подвижка Slip	Простираание Strike	Падение Dip	Подвижка Slip
1	NEIC USGS	256	15	152	13	82	74
2	GCMТ	151	32	53	13	65	110
3	ИМГиГ ДВО РАН, наст. работа	143 (175)	48 (36)	48 (52)	17 (39)	56 (62)	127 (114)

Таблица 7. Параметры механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. (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) () – результаты определений по программе «МЕХ».

Независимое определение механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. В работе (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) выполнялось с использованием базовых алгоритмов программы «МЕХ» (Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока) // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР (методические работы ЕССН). М.: Наука, 1989. С. 32-51.). В качестве исходной информации послужили сведения о знаках движений в волнах P_n , P^* , P_g , P и pP . Для уточнения полученного решения привлекались знаки в волнах S (S_n , S^* и S_g). Полученное решение механизма очага представлено на Рисунке 36 (Таблица 7, № 3).

Похожее решение было получено в рамках проекта Global Centroid-Moment-Tensor (GCMТ, The Global Centroid-Moment-Tensor Project: электронный ресурс²⁷). GCMТ публикует тензор сейсмического момента очага землетрясения, полученный методом инверсии волновых форм, и является продолжением Гарвардского каталога механизмов. В рамках данной методики представленное решение является эффективно средним механизмом за время вспарывания

²⁷ <http://www.globalcmt.org>

разрыва (то же относится и к глубине). Отметим небольшое отличие полученного решения при сравнении с данными агентства NEIC USGS (Таблица 7, № 1). Однако сравниваемые механизмы можно считать идентичными по типу сейсмодислокации и ориентации главных осей напряжений (Таблица 6).

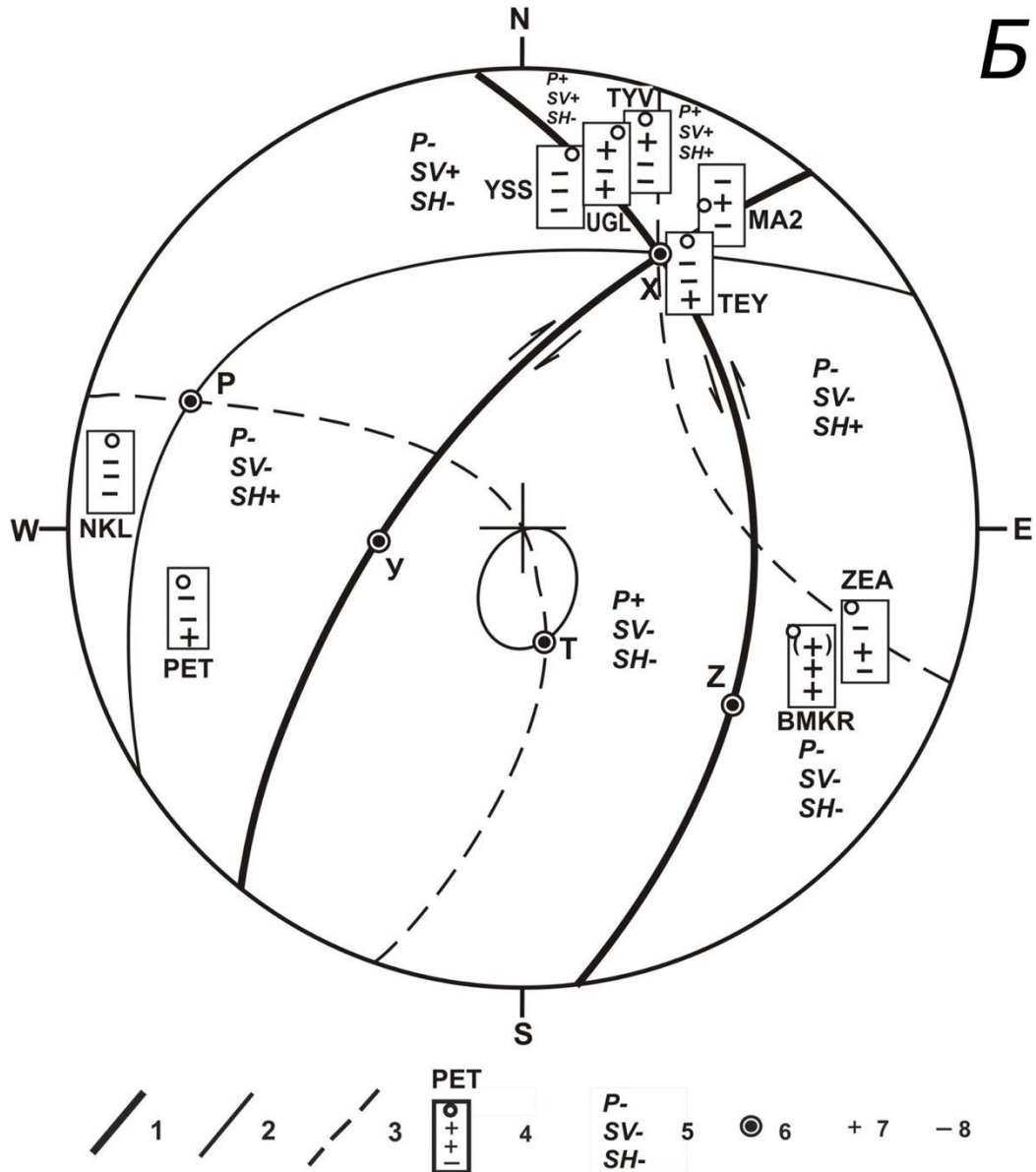


Рисунок 36. Решение механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. (Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 года ($M_w=5.8$) на северо-западе о. Сахалин // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 37-49) в проекции на верхнюю полусферу (программа «МЕХ»): 1-3 – нодальные линии $P=0$, $SV=0$ и $SH=0$, соответственно; 4-5 – знаки первых движений в P-, SV- и SH-волнах: 4 – экспериментальные (пустой кружок соответствует волне, распространяющейся от очага вниз, зачерненный – волне, распространяющейся от очага вверх); 5 – теоретические; 6 – оси P, T, X, Y, Z; 7-8 – знаки первых движений в P-волне.

Таким образом, результаты определения механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. (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) в рамках различных методических и алгоритмических подходов позволяют дать сеймотектоническую интерпретацию данного явления. Очаг землетрясения характеризуется близгоризонтальным напряжением сжатия, ориентированного субширотно, что в целом хорошо согласуется с современными представлениями о характере деформирования Северного Сахалина (Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 42-28), тип подвижки – взбросо-сдвиг. Одна из возможных плоскостей разрыва (NP1) имеет юго-восточное простирание и падение на юго-запад, при этом юго-западное крыло разрыва поднялось и сместилось к юго-востоку. Вторая возможная плоскость разрыва (NP2) имеет северо-восточное простирание с падением на юго-восток, при этом юго-восточное крыло разрыва поднялось и сместилось на юго-запад. По обеим плоскостям произошла подвижка типа взброса, с левосторонней (по NP1) или правосторонней (по NP2) сдвиговыми компонентами движения.

Анализируя механизмы очагов землетрясений (Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.), произошедших в этом районе, можно увидеть, что положение оси растяжения довольно неустойчивое, т.е. достаточно небольшие (несколько градусов) вариации положения главных осей напряжения приводят к изменению типа дислокации. Особенно отчетливо это видно на примере землетрясения 22 июля 1990 г., которое локализованы в пределах той же сейсмогенной зоны, что и землетрясение 2005 г. Оба события обрабатывались в неоптимальной системе наблюдений, характерной для региона, – в условиях односторонней разреженной сети. Однако в то время как землетрясение 2005 г. было уверенно зарегистрировано телесеismicкой сетью станций, и как указывалось выше, был определён его тип сейсмодислокации – взброс, то предшествующее ему событие 1990 г., магнитуда которого $M_{LN}=4.8$, было обработано только региональными станциями, соответственно рассеяние в определении параметров сейсмодислокаций составляет более 15 град. С учетом такой погрешности определения тип дислокации может трансформироваться во взброс, что, по всей видимости, более соответствует реальной картине действующих в данном регионе тектонических напряжений.

Геологическая обстановка. Детальные сейсмологические наблюдения на севере о. Сахалин стали проводиться с конца 2006 г. (Коновалов А.В., Степнов А.А., Патрикеев В.Н. Организация автоматизированного рабочего места сейсмолога с использованием пакета

сейсмологических программ SEISAN // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 4. С. 34-49), почти через один год после возникновения Пильтунского землетрясения 2005 г., поэтому провести объективный анализ афтершокового режима не представляется возможным. Однако рассматривая совокупность землетрясений, произошедших в шельфовой зоне острова за последние несколько лет, можно изучить их общие особенности, как проявления единого геологического процесса, в том числе связанного с возникновением Пильтунского землетрясения 2005 г. На Рисунке 31 изображена карта эпицентров местных землетрясений с локальной магнитудой $M_L \geq 2.0$, зарегистрированных с сентября 2006 г. по июнь 2014 г. В пределах северо-восточного шельфа с 52.5 по 55.0 гр. с.ш., в зоне Восточно-Сахалинского глубинного разлома (немного восточнее осевой линии разлома, изображенной на Рисунке 31), вдоль простираения его основных структур локализованы очаги слабых и средне умеренных землетрясений, их глубина составляет 10-20 км. Это подтверждает современную активность данной геологической структуры, протяженность которой составляет приблизительно 250-300 км.

Рассматриваемое землетрясение 12 июня 2005 г. ($M_w=5.6$) произошло у внешнего края восточного шельфа Северного Сахалина. На востоке он граничит с Дерюгинской впадиной, относящейся к Охотоморской депрессии. В структурном отношении шельф представляет собой систему субмеридиональных, чередующихся поднятий и впадин. Впадины практически полностью компенсированы осадконакоплением.

По материалам сейсмических исследований в направлении с запада на восток выделяются следующие основные структурные элементы: Пильтунская синклиальная зона, Одоптинская и Восточно-Одоптинская антиклинальные зоны. Мористее располагается Восточно-Сахалинский прогиб и его не компенсированная осадками часть – замкнутая батинальная впадина Дерюгина, или Дерюгинский осадочный бассейн (Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.). Одоптинская и Восточно-Одоптинская антиклинальные зоны разделяются очень узким прогибом, который на большинстве сейсмических профилей практически не проявляется в рельефе фундамента и дна, а более уверенно прослеживается в морфологии отражающих горизонтов. Таким образом, по сейсмическим данным создается впечатление, что эти две структуры объединяются в одно антиклинальное поднятие со сходным характером деформаций позднемiocенового-плиоценового возраста. С западной стороны оно ограничено Западно-Одоптинским разломом, к которому примыкает Пильтунская синклиальная зона, где кровля фундамента погружается с 3 до 10 км. С востока это поднятие ограничено Восточно-Сахалинским разломом, к которому примыкает Восточно-Сахалинский прогиб, где фундамент погружается до 7-8 км. Таким образом, исходя из структурных особенностей строения северо-восточного шельфа о. Сахалин можно предполагать, что наиболее крупные сейсмические события в этом районе должны

происходить в Восточно-Сахалинской и Западно-Одоптинской разломных зонах. В связи с этим представляет интерес рассмотреть их строение.

Западно-Одоптинский разлом изучен слабо. Согласно классификации разломов о. Сахалин, предложенной В.В. Харахиновым (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.), он относится к верхнекоровым листрическим разломам, субгоризонтальные поверхности которых подстилают верхнюю часть коры. Они распространены в аккреционных и присдвиговых системах в виде сбросов, ограничивающих крупные мегасинклинали и присдвиговые впадины. На карте разломной тектоники Северного Сахалина (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.) данный разлом располагается в зоне перехода от Пильтунской мегасинклинали к Одоптинской антиклинальной зоне (Рисунок 33), где происходит подъем фундамента по крайней мере на 6 км. Однако на большинстве сейсмических разрезов в осадочном чехле этой зоны не наблюдается значительных дизъюктивных нарушений при огромных амплитудах четвертичных пликтивных деформаций. Непротяженные дизъюктивные нарушения выделяются лишь в фундаменте вблизи свода Одоптинской антиклинали с обеих сторон от нее и представляют собой малоамплитудные сбросы, связанные с опусканием сводовой части этой антиклинали (Рисунок 37). Такие нарушения характерны для большинства сводов крупных антиклиналей и обусловлены деформациями растяжения при их изгибе. Исходя из этого можно заключить, что Западно-Одоптинский разлом трассирует систему современных присводовых, преимущественно западного падения, нарушений Одоптинской антиклинальной зоны и с ним могут быть связаны верхнекоровые (до 7-9 км) землетрясения сбросового типа. В настоящий момент данная структура сейсмически менее активна, чем Восточно-Сахалинский разлом. Это подтверждает общая картина пространственного распределения современной сейсмичности на севере острова, представленная на Рисунке 31. Магнитуда немногочисленных землетрясений, зарегистрированных в этой зоне в 2006-2014 гг., составляет $M \sim 2.0-3.0$.

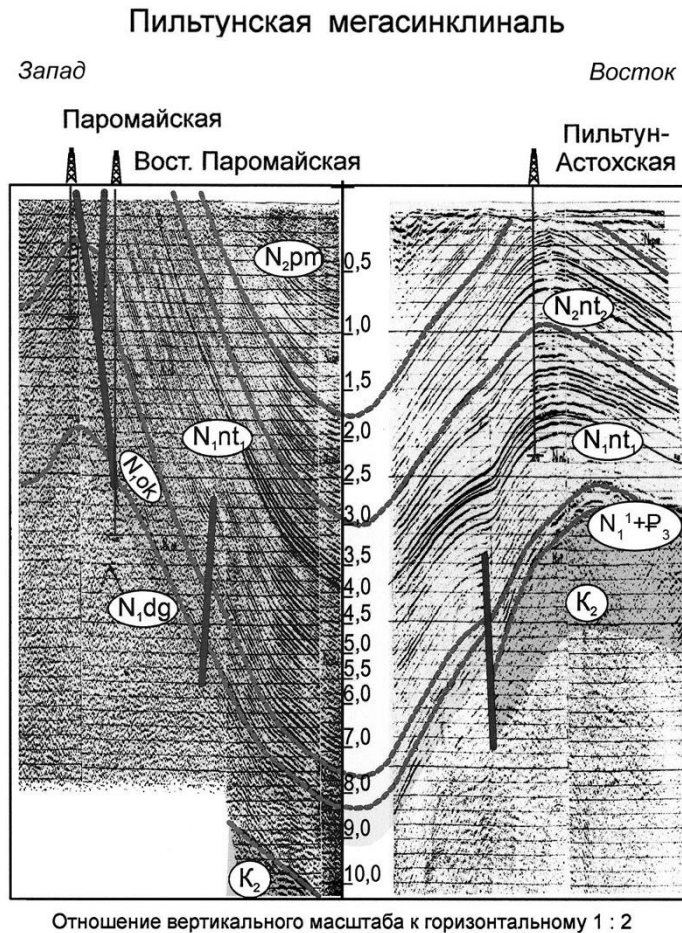


Рисунок 37. Сейсмический разрез, иллюстрирующий сброс в сдвиговой части
Одоптинской антиклинальной зоны.

По материалам аэромагнитной съемки, а позднее морской магниторазведки, у края шельфа Северо-Восточного Сахалина выделена Восточно-Сахалинская магнитная аномалия (Рисунок 33), которая прослеживалась от Восточного хребта п-ова Шмидта в юг-юго-восточном направлении на расстоянии более 300 км, и в плане совпала с Восточно-Одоптинской антиклинальной зоной. Таким образом, произошло обособление этой зоны и с ней стали связывать насыщенный телами ультрабазитов Восточно-Сахалинский глубинный разлом восточного падения (Маргулис Л.С. [и др.]. Геологическое строение северо-западной части Охотского моря // Советская геология. 1979. № 7. С. 61-71). В пределах п-ова Шмидта разлому соответствует дислоцированная зона шириной около километра, в которой развиты рассланцованные серпентиниты, габброиды и серпентинитовый меланж. Разлом ограничивает с запада массив серпентинитовых перидотитов. На шельфе офиолитовый пояс, контролируемый Восточно-Сахалинским разломом, погружается в юго-восточном направлении до 5 км (Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.). В осадочном чехле разлому соответствуют структуры Трехбратской и Восточно-Одоптинской антиклинальных зон.

В (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.) Восточно-Сахалинский глубинный разлом рассматривается как крупная сдвиговая зона, в пределах которой интенсивно развиваются процессы серпентинизации ультраосновных пород и формирования инверсионных складчатых структур. При этом утверждается, что дизъюнктивная нарушенность в зоне разлома, особенно для его южной части, характерна только для палеоген-миоценовых отложений. На основании этого можно сделать вывод о резком снижении его современной активности. Однако на всех сейсмических разрезах, представленных в работе (Lomtev V.L., Litvinova A.V. New data on the structure of the offshore margin of the Northern Sakhalin // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. Т. 2. № 1. С. 83-94), в районе Трехбратской антиклинальной зоны на уровне островного шельфа наблюдается абразия вершин складок в осадочном чехле, что свидетельствует о четвертичном поднятии этой зоны. Рассматриваемые складки в основном симметричны и связаны с молодой, вероятно ранне-среднечетвертичной, интрузией ультрабазитов по зоне фронтального глубинного разлома Сахалинской кордильеры (Lomtev V.L., Litvinova A.V. New data on the structure of the offshore margin of the Northern Sakhalin // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. Т. 2. № 1. С. 83-94), либо протрузией серпентинитов (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.).

Восточно-Сахалинский разлом характеризуется современной активностью и его следует относить по мнению В.В. Харахинова (Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.) к нижнекоровым листрическим разломам восточного падения с глубиной проникновения его субгоризонтальной части не менее 30-35 км, а связанные с ним землетрясения в большинстве своем являются средне- и нижнекоровыми, и не исключена возможность возникновения крупных сейсмических событий. Однако выявленные особенности строения разлома сложно увязать с современной сейсмической активностью данного района и его геологической структурой. Например, все эпицентры землетрясений в этой зоне (Рисунок 31) располагаются существенно восточнее оси Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны, а в центральной и особенно северной ее частях они смещаются на восток на 30 и более км. Кроме того, взбросовый тип подвижки Пильтунского землетрясения 2005 г. не соответствует погружению восточного крыла разлома по геологическим данным.

Противоречия между сейсмологическими и геологическими данными могут быть устранены если предположить, что разлом, который определяет сейсмичность данного района, располагается в основании восточного крыла Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны. Такой разлом уверенно выделяется на всех сейсмических разрезах, представленных в (Lomtev V.L., Litvinova A.V. New data on the structure of the offshore margin of the Northern Sakhalin // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. Т. 2. № 1. С. 83-94), в осевой зоне узкого синклинального прогиба в рельефе фундамента, глубиной 8-10 км, сопряженного с востока с выступом

акустического фундамента. Он также является нижнекоровым, листрическим разломом, но в отличие от Восточно-Сахалинского имеет западное падение и отличается преимущественно взбросовым характером подвижек с активным западным крылом (Рисунок 38). Поскольку данный разлом открывает при движении с востока на запад систему субмеридиональных разломов Сахалина, то его предлагается называть Фронтальным.

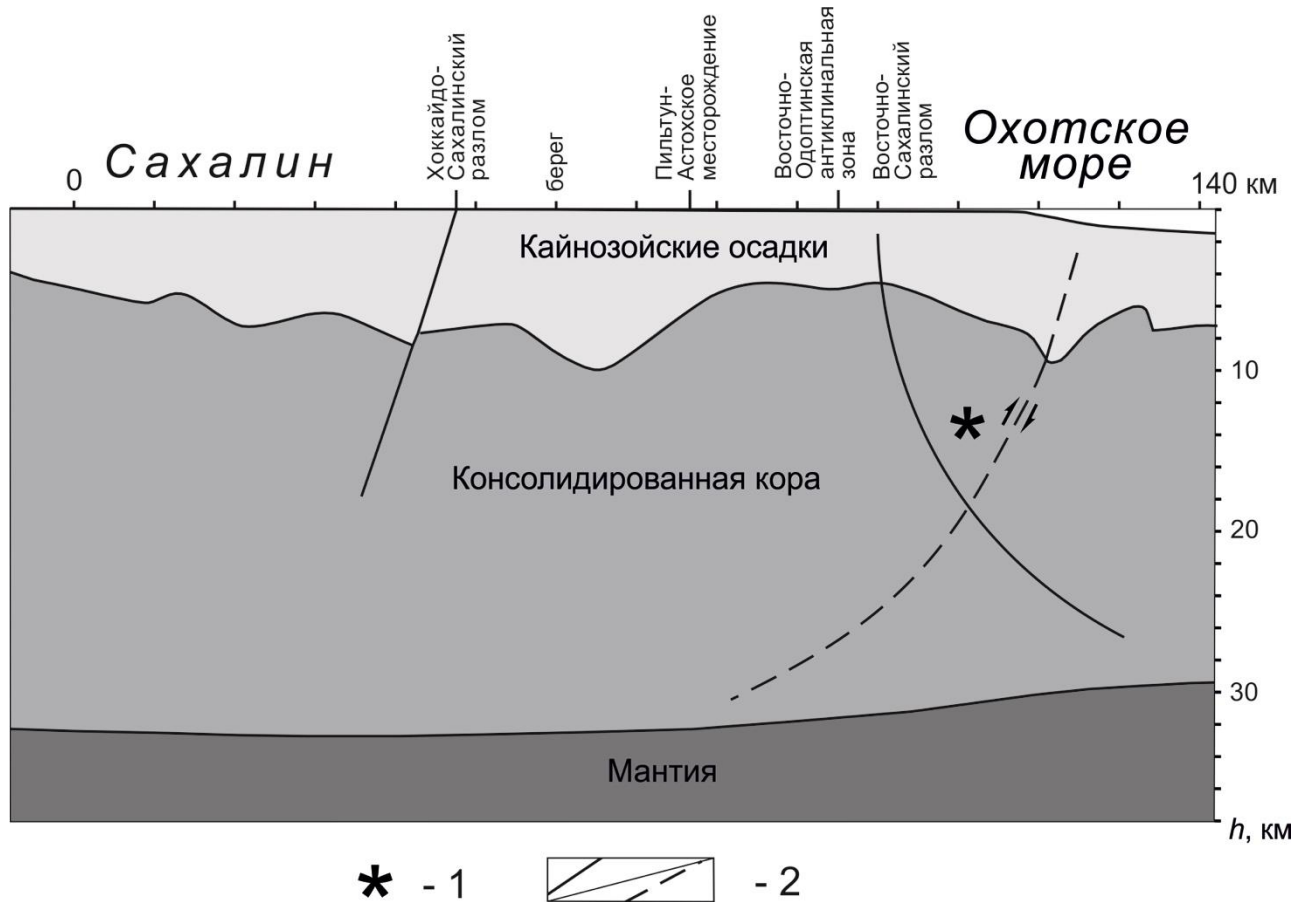


Рисунок 38. Разрез земной коры Сахалина и его северо-восточного шельфа на широте Пильтунского землетрясения 2005 г. 1 – очаг землетрясения; 2 – разломы: а (сплошные линии) – установленные, б (пунктир) – предполагаемые.

Таким образом, в геологическом строении Северного Сахалина Одоптинскую и Восточно-Одоптинскую антиклинальные зоны в совокупности следует рассматривать как надвиговую пластину, которая по Фронтальному разлому смещается в восток северо-восточном направлении. Восточно-Сахалинский разлом представляет собой листрический сбросо-сдвиг в осевой части Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны. А узкий прогиб в рельефе фундамента рассматривается как компенсированный осадками желоб в передней части крупной надвиговой пластины, ширина которой (Рисунок 38) составляет 50 км, а длина более 250 км.

4.4. Особенности постсейсмического процесса

По результатам детальных сейсмологических наблюдений (Рисунок 31), с учетом новых данных о региональной сейсмичности (Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с; Каталог землетрясений Сахалина за 2005 год // Землетрясения Северной Евразии 2005. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 465-470), установлено, что в афтершоковой зоне Пильтунского землетрясения с июня 2005 г. по июнь 2011 г. произошло всего два землетрясения с $M \geq 4.0$: 12 июня 2005 г. ($M=5.5$, $M_w=5.6$), 5 сентября 2005 г. ($M=4.0$, $m_b=4.1$) и 22 августа 2009 г. ($M=5.0$, $m_b=4.8$). Данный факт подтверждают независимые источники сейсмологической информации, например NEIC USGS (Earthquake Hazards Program: электронный ресурс²⁸).

Событие 5 сентября 2005 г., которое произошло спустя три месяца с момента возникновения главного события 12 июня 2005 г., можно уверенно отнести к афтершоку. Подобная картина наблюдалась во время развития афтершокового процесса в 2010-2013 гг. после Уангского землетрясения 16 марта 2010 г. ($M_L=5.7$, $M_w=5.8$) на северо-западе о. Сахалин, когда самое сильное повторное событие с локальной магнитудой $M_L=5.1$ было зарегистрировано спустя четыре месяца. Еще одно сильное повторное событие ($M_L=5$) в афтершоковой зоне Уангского землетрясения 2010 г. произошло 24 ноября 2013 г., т.е. спустя три с половиной года после главного события. Таким образом, событие 22 августа 2009 г. в окрестностях очаговой зоны Пильтунского землетрясения 2005 г. также укладывается в картину постсейсмического процесса на севере о. Сахалин, характеризующегося серией сильных повторных землетрясений (Рисунок 39, Рисунок 40).

Для исследования постсейсмического процесса релаксации напряжений на севере о. Сахалин были проанализированы афтершоковые последовательности еще двух землетрясений, произошедших на севере острова в 2011 и 2012 гг. Тымовское землетрясение 12 декабря 2011 г. (Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.) с магнитудой $M_L=5.4$ характеризуется высоким уровнем афтершоковой активности первых и последующих суток. После главного события было зарегистрировано более 600 повторных событий из афтершоковой зоны с $M_L \geq 0$. За первые сутки было зарегистрировано около 50% афтершоков от их общего числа за две недели. Наибольшей силы афтершок с $M_L=3.9$ был зарегистрирован спустя 1 час. Схожее по силе землетрясение с $M_L=3.7$ произошло спустя 6 минут после главного события (Рисунок 41). Однако сильнейшее повторное сейсмическое событие произошло только через девять месяцев

²⁸ <http://earthquake.usgs.gov>

после главного события, 11 сентября 2012 г., и имело магнитуду $M_L=4.4$. Как видно из рисунка еще одно повторное событие ($M_L=3.5$) произошло 22 марта 2015 г., т.е. спустя почти три года и три месяца после главного события.

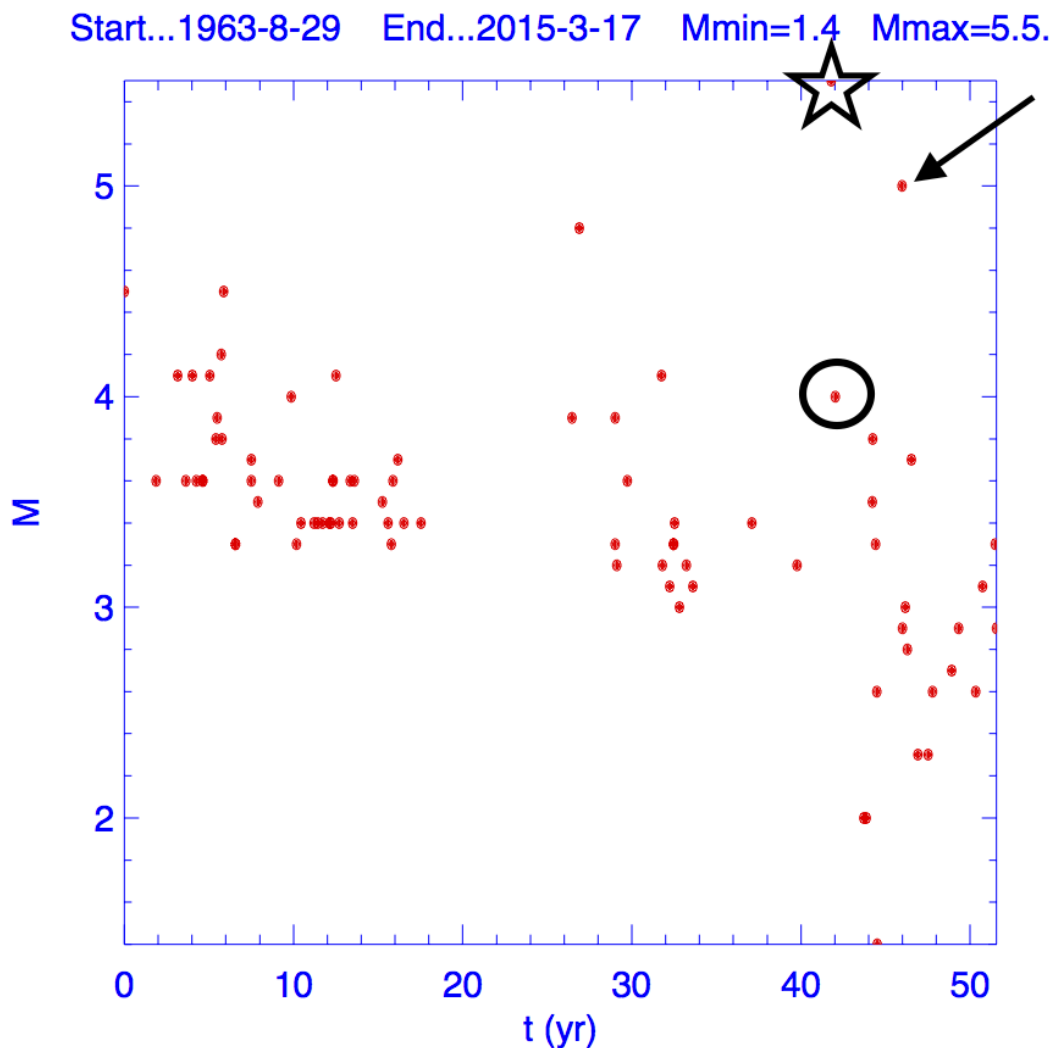


Рисунок 39. Историческая сейсмичность в зоне Пильтунского землетрясения. Звездой обозначен главное событие ($M=5.5$) 12 июня 2005 г.; овалом – сильнейшее повторное событие ($M=4.0$) 5 сентября 2005 г.; стрелкой – событие ($M=5.0$) 22 августа 2009 г..

Магнитуда Охинского землетрясения, произошедшего 21 октября 2012 г., составила $M_L=4.8$. По данным каталога локальной сети сейсмических станций на Северном Сахалине в афтершоковой зоне землетрясения 21 октября 2012 г. было зарегистрировано 169 сейсмических событий с $M_L \geq 2$, из которых только за первые двое суток станции зарегистрировали более полусотни афтершоков. Магнитуды сильнейших афтершоков в первые сутки после главного события составили соответственно $M_L 3.9$ и $M_L 3.7$. Магнитуда сильнейшего повторного события составила $M_L=4.4$. Оно произошло 24 января 2013 г., т.е. спустя три месяца после главного события (Рисунок 42). По всей видимости, еще одно ожидаемое повторное землетрясение,

которое по наблюдаемой закономерности должно произойти спустя около трех с половиной лет, т.е. в апреле 2016 г., еще не настало.

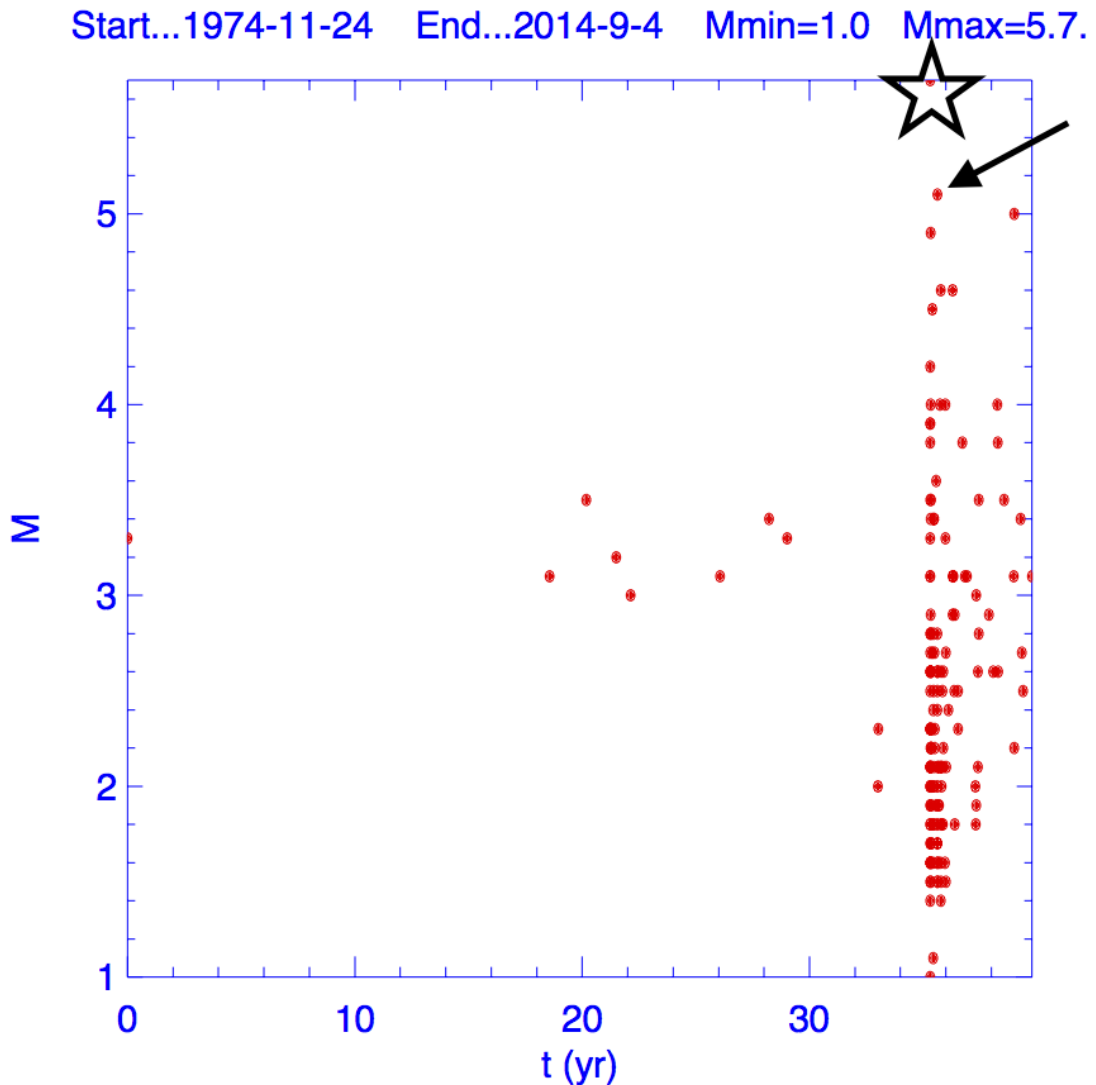


Рисунок 40. Историческая сейсмичность в зоне Уангского землетрясения. Звездой обозначено главное событие ($M=5.7$) 16 марта 2010 г.; стрелкой – сильнейшее повторное событие ($M=5.1$) 9 июля 2010 г.

Таким образом, получены новые данные о характере долговременного постсейсмического процесса сильных землетрясений Северного Сахалина, в том числе в районах промышленного освоения месторождений нефти и газа. Выявлена закономерность возникновения сильнейших повторных сейсмических событий. 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.

Start...1991-12-13 End...2015-3-24 Mmin=1.0 Mmax=5.4.

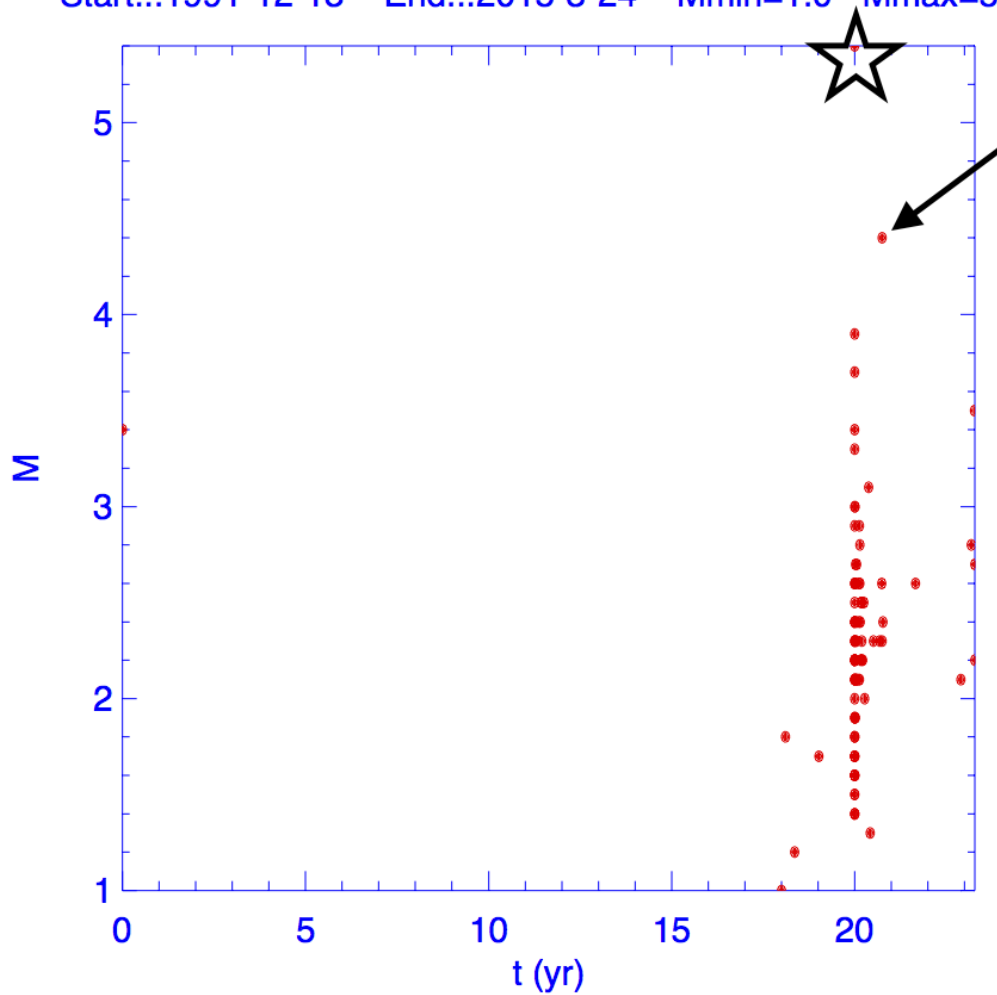


Рисунок 41. Историческая сейсмичность в зоне Тымовского землетрясения. Звездой обозначено главное событие ($M=5.4$) 12 декабря 2011 г., стрелкой сильнейшее повторное событие ($M=4.4$) 11 сентября 2012 г.

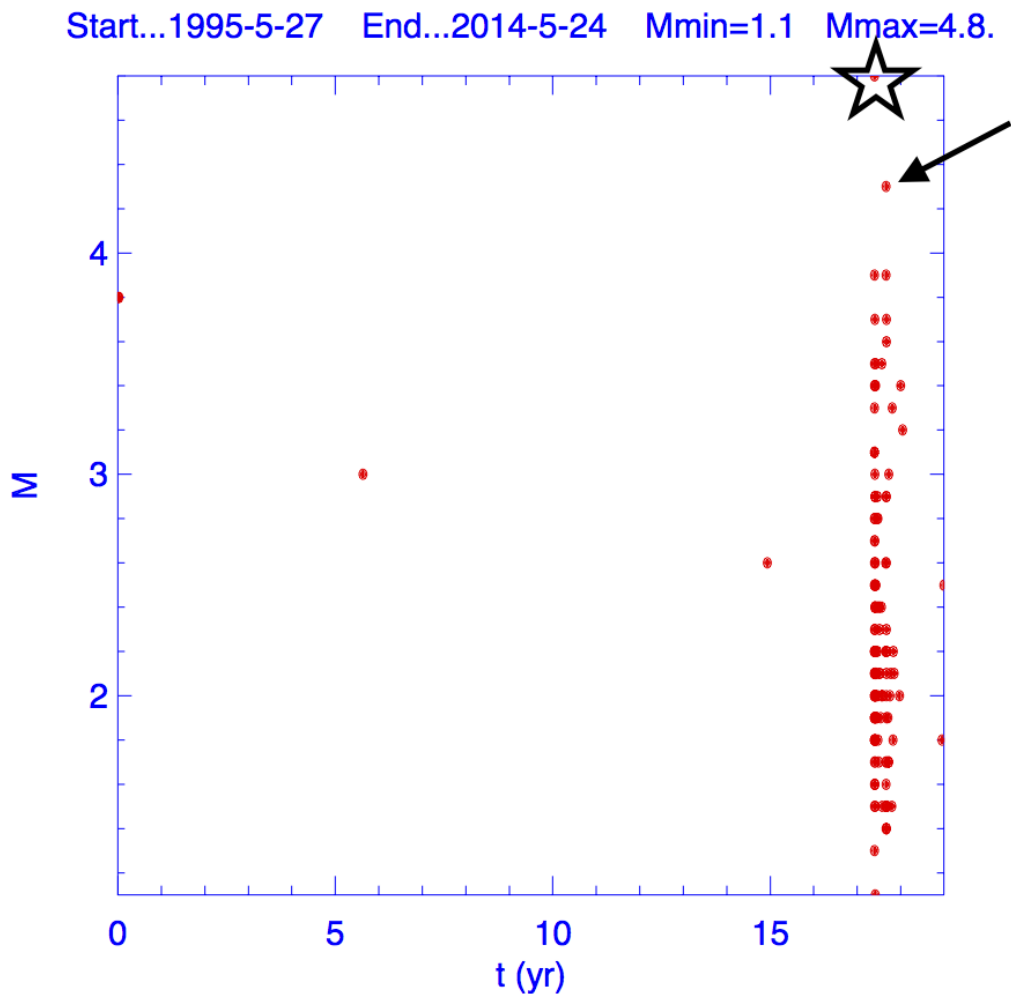


Рисунок 42. Историческая сейсмичность в зоне Охинского землетрясения. Звездой обозначено главное событие ($M=4.8$) 21 октября 2012 г.; стрелкой – сильнейшее повторное событие ($M=4.4$) 24 января 2013 г.

4.5. Выводы

По результатам детальных сейсмологических наблюдений проанализирована современная сейсмичность Северного Сахалина. 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.

Многоплановое исследование Пильтунского землетрясения 2005 г. позволило дать сеймотектоническую и структурно-геологическую интерпретацию данного явления.

По совокупности независимых определений механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. 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 простираения 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.

Полученные в настоящей главе результаты позволяют установить особенности характера постсейсмического процесса сильных землетрясений Северного Сахалина, в том числе в районе производственной деятельности: 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.

Заключение

В настоящей работе выполнен критический обзор существующих в мировой практике программных продуктов и открытых систем для анализа зарегистрированной сейсмической информации. Разработаны концепция развития автоматизированной системы детальных сейсмологических наблюдений на севере о. Сахалин и технические требования к системе. Разработана уникальная архитектура комплексной автоматизированной системы мониторинга за естественной и наведенной сейсмичностью объединяющая системы реального времени и постобработки, подобраны оптимальные параметры скоростной модели для системы, определены регистрационные возможности локальной сети сейсмических станций. На примере действующей сети наблюдений на севере о. Сахалин реализована полная автоматизация процедур сбора, передачи, хранения и рутинной обработки данных.

Выполнен обзор известных случаев возникновения техногенной сейсмичности, напрямую связанной с промышленным освоением месторождений нефти и газа. Рассмотрены случаи индуцированных и триггерных землетрясений. Обоснована актуальность организации и проведения непрерывных детальных сейсмологических наблюдений в районе промышленных объектов нефтегазовой индустрии на Северном Сахалине.

По результатам детальных сейсмологических наблюдений проанализирована современная сейсмичность Северного Сахалина. 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.

По совокупности независимых определений механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. 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 настоящей работе установлены особенности характера постсейсмического процесса сильных землетрясений Северного Сахалина, в том числе в районе производственной деятельности: 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.

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 возникнуть в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин в результате их многолетнего промышленного освоения.

Список литературы

1. Allen R. Automatic phase pickers: their present use and future prospects //Bulletin of the Seismological Society of America. 1982. T. 72. №. 6B. C. S225-S242.
2. Applications Using ObsPy: URL -<https://github.com/obspy/obspy/wiki#use-cases--applications-using-obspy>
3. ArcLink documentation: URL - <http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/arclink>
4. Baker M. R., Doser D. I., Luo M. Geologic and oil field controls on earthquakes in the War-Wink Field, Delaware Basin //Bulletin-West Texas Geol. Soc. – 1991. – T. 31. – №. 1. – C. 5-12.
5. Bath M. Introduction to seismology. – Birkhäuser, 2013. – P. 428.
6. Baranova V., Mustaqeem A., Bell S. A model for induced seismicity caused by hydrocarbon production in the Western Canada Sedimentary Basin // Canadian Journal of Earth Sciences. 1999. T. 36. C. 47-64.
7. Bardainne T., Senechal G., Grasso J.R. Study of a gas field fracturation based on induced seismicity in 3D seismic data. // Geophysical Research Abstracts, European Geophysical Society, 2003, V.5, 06453.
8. Ben-Zion Y. Collective behavior of earthquakes and faults: continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes // Rev. Geophys. 2008. T. 46. RG4006. C. 70.
9. Ben-Zion Y. Collective behavior of earthquakes and faults: Continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes //Reviews of Geophysics. – 2008. – T. 46. – №. 4.
10. Beyreuther M. et al. ObsPy: A Python toolbox for seismology //Seismological Research Letters. 2010. T. 81. №. 3. C. 530-533.
11. Bossu R., Grasso J.R., Plotnikova L.M. et al. Complexity of intracontinental seismic faultings: The Gazli, Uzbekistan, sequence // Bull. Seis. Soc. Am. 1996. T. 86. C. 959-971.
12. Doser D. I., Baker M. R., Mason D. B. Seismicity in the War-Wink gas field, Delaware Basin, west Texas, and its relationship to petroleum production //Bulletin of the Seismological Society of America. – 1991. – T. 81. – №. 3. – C. 971-986.
13. Douglas A. Joint epicenter determination // Nature. – 1967. – Vol. 215. – P. 47–48.
14. Earthquake Hazards Program: URL: <http://earthquake.usgs.gov>

15. Earthworm User Guide: URL - <http://love.isti.com/trac/ew/wiki/Earthworm>
16. Earthworm Central, new site for the Earthworm software and community: URL - <http://earthwormcentral.org>
17. Evans M.D. Man made earthquakes in Denver // *Geotimes*.1966. N 10.
18. Geiger L. Probability method for determination of earthquake epicenters from the arrival times only // *Bul. St. Louis Univ.* – 1912. – Vol. 8. – P. 60–71.
19. Geofon program: URL - <http://geofon.gfz-potsdam.de>
20. Gomberg J.S., Shedlock K.M., Roecker S.W. The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation // *Bul. Seis. Soc. Am.* – 1990. – Vol. 80. – P. 1605–1628.
21. Grasso J.R. Mechanics of Seismic Instabilities induced by the Recovery of Hydrocarbons // *Pure Appl. Geophys.* 1992. T. 139. C. 507-534.
22. Grasso J.R. Mechanics of Seismic Instabilities induced by the Recovery of Hydrocarbons // *Pure Appl. Geophys.* 1992. T. 139. C. 507-534.
23. Grasso, J.R., Feignier, B. Geomechanical behavior and structural evolution induced by a depletion. A case study of a gas field. // *Rockbursts and seismicity in mines*. Balkema, 1990. C.53-60.
24. Havskov J., Ottemoller L. SEISAN earthquake analysis software // *Seismological Research Letters*. 1999. T. 70. №. 5. C. 532-534.
25. Healy J.H., Rubey W.W., Griggs D.T., Raleigh C.B. The Denver earthquakes // *Science*. 1968. № 161. C. 1301-1310.
26. Herrmann R. B. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research // *Seismological Research Letters*. 2013. T. 84. №. 6. C. 1081-1088.
27. <http://www.globalcmt.org>, The Global Centroid-Moment-Tensor Project.
28. IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology: URL - <http://www.iris.edu>
29. IRIS ringserver software wiki: URL - <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/ringserver/wiki>
30. Ivashchenko A. I. et al. The Neftegorsk, Sakhalin Island, earthquake of 27 May 1995 // *Island Arc*. – 1997. – T. 6. – №. 3. – C. 288-302.
31. IRIS SeedLink Overview : URL - <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink/>
32. Kagan Y., Knopoff L. Statistical search for non-random features of the seismicity of strong earthquakes // *Physics of the earth and planetary interiors*. 1976. T. 12. №. 4. C. 291-318.

33. Katsumata K., Kasahara M., Ichiyanagi M. et al. The 27 May 1995 MS 7.6 Northern Sakhalin earthquake: an earthquake on an uncertain plate boundary // *Bull. Seis. Soc. Am.* 2004. T. 94. № 1. C. 117-130.
34. 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. C. 02-171.
35. Lee M. K. W., Finn W. D. L. DESRA-2: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential. – Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 1978.
36. Lienert B. R., Havskov J. A computer program for locating earthquakes both locally and globally // *Seismological Research Letters*. 1995. T. 66. №. 5. C. 26-36.
37. Lofgren B. E. Hydraulic stresses cause ground movement and fissures, Picacho, Arizona // *Geol Soc Am Abstr Programs*. – 1978. – T. 10. – №. 3. – C. 113.
38. Lomtev V.L., Litvinova A.V. New data on the structure of the offshore margin of the Northern Sakhalin // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. V. 2. No. 1. P. 83-94.
39. Maury V., Fourmaintraux D., coordinnateurs. *Mecanique des roches appliquee aux problemes d'exploration et de production petrolieres*. // Societe Nationale Elf Aquitaine (production) boussens 1993.
40. Maury V., Piau J.-M., Halle G. Subsidence induced by water injection in water sensitive reservoir rocks: the example of Ekofisk. // *SPE European Petroleum Conference held in Milan, Italy, 22-24 October 1996*.
41. McGarr A. On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1991. – T. 81. – №. 3. – C. 948-970.
42. McGarr, A., Simpson D., Seeber L. Case Histories of Induced and Triggered Seismicity // *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A* / W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger editors. Academic Press, London, 2002. C. 647-661.
43. Milne W.G., Berry M.J. Induced seismicity in Canada // *Eng. Geol.* 1976. T. 10. C. 219-226.
44. Nanjo K. Z. et al. Decay of aftershock activity for Japanese earthquakes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*. 2007. T. 112. №. B8.
45. Nicholson C., Wesson R. L. Triggered earthquakes and deep well activities // *Pure and Applied Geophysics*. – 1992. – T. 139. – №. 3-4. – C. 561-578.

46. NIED – National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention: URL - <http://www.bosai.go.jp>
47. Odonne F. et al. Abnormal reverse faulting above a depleting reservoir //Geology. 1999. T. 27. №. 2. C. 111-114.
48. Olivieri M., Clinton J. An almost fair comparison between Earthworm and SeisComp3 //Seismological Research Letters. 2012. T. 83. №. 4. C. 720-727.
49. Ottemoller L., Havskov J. SeisNet: A general purpose virtual seismic network //Seismological Research Letters. 1999. T. 70. №. 5. C. 522-528.
50. Ottemöller L., Nielsen H.H., Atakan K. et al. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. Geophys. Res. 2005. T. 110. № B10301. C. 1-15.
51. Paige C. C., Saunders M. A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares //ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). – 1982. T. 8. №. 1. C. 43-71.
52. Pavlis G.L. Appraising earthquake hypocenter location errors: a complete, practical approach for single-event locations // Bul. Seis. Soc. Am. – 1986. – Vol. 76. – P. 1699–1717.
53. Pujol J. Comments on the joint determination of hypocenters and station corrections // Bul. Seism. Soc. Am. – 1988. – Vol. 78. – P. 1179–1189.
54. Raleigh C. B., Healy J. H., Bredehoeft J. D. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado //Science. – 1976. – T. 191. – №. 4233. – C. 1230-1237.
55. Robert R.G., Christofferson A., Cassidy F. Real time event detection, phase identification and source location using single station 3 component seismic data and a small PC // Geophysical Journal. – 1989. – Vol. 97. – P. 471–480.
56. Rutledge J. T. et al. Reservoir microseismicity at the Ekofisk oil field //Rock Mechanics in Petroleum Engineering. – Society of Petroleum Engineers, 1994.
57. RTPD Installation and Users Guide Version 2.1.7.0 : URL - <http://l2a.ucsd.edu/local/Manuals/RTPD.pdf>
58. Scheifler, R.W. X Window System Protocol. X Consortium Standard. X Version 11, Release 7.7. Version 1.0. 2012 / R.W. Scheifler – URL: <http://www.x.org/releases/X11R7.7/doc/xproto/x11protocol.html>.
59. Schwall, G. H, Denney, C.A. Subsidence induced casing deformation mechanisms in the Ekofisk field. // 1994, Society of Petroleum Engineers, Inc.SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference held in Delft, The Netherlands, 29-31 August 94
60. SEED Format Version 2.4: URL - http://www.fdsn.org/seed_manual/SEEDManual_V2.4.pdf

61. Segall P. Earthquakes triggered by fluid extraction // *Geology*. – 1989. – T. 17. – №. 10. – C. 942-946.
62. Segall P. Induced stresses due to fluid extraction from axisymmetric reservoirs // *Pure Appl. Geophys.* 1992. T. 139. C. 535-560.
63. Segall P., Grasso J.R., Mossop A. Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France // *J. Geophys. Res.* 1994. T. 99. C. 15423-15438.
64. Segall P., Fitzgerald S. D. A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs // *Tectonophysics*. – 1998. – T. 289. – №. 1. – C. 117-128.
65. Segall R. Stress and subsidence resulting from subsurface fluid withdrawal in the epicenter region on the 1983 coaling earthquake // *J. Geophys. Res.* 1985. № 9. C. 6801-6816.
66. SeisComp Data Structure (SDS) 1.0: URL - <http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/slarchive/SDS>
67. Shcherbakov R., Turcotte D. L., Rundle J. B. Aftershock statistics // *Pure and Applied Geophysics*. 2005. T. 162. №. 6-7. C. 1051-1076.
68. Simpson D. W. Triggered earthquakes // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1986. – T. 14. – C. 21.
69. Snoke J.A., Munsey J.W., Teague A.C. et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data // *Earthquake Notes*. 1984. V. 55 No. 3. P. 15.
70. Socolofsky, T.A TCP/IP Tutorial. RFC 1180, 1991/ T. Socolofsky, C. Kale. – URL: <http://tools.ietf.org/pdf/rfc1180>.
71. Suckale J. Induced seismicity in hydrocarbon fields // *Advances in Geophysics*. 2009. T. 51. C. 55-106.
72. Suckale J. Moderate-to-large seismicity induced by hydrocarbon production // *The Leading Edge*. – 2010. T. 29. №. 3. C. 310-319.
73. 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. – T. 119. – №. 3. – C. 1904-1923.
74. SWARM, Seismic Wave Analysis and Real-time Monitor: user manual and reference guide: URL - http://volcanoes.usgs.gov/software/doc/swarm_v2.pdf
75. Sylte J. E. , L. K. Thomas, D. W. Rhett. Water Induced Compaction in the Ekofisk Field. // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston, Texas, 3-6 October 1999*.

76. Technical Specifications of a LE_3DLite MKII Seismometer: URL - http://www.lennartz-electronic.de/PDF/Seismometers_print.pdf
77. The project site of SeisComp3: URL - <https://www.seiscomp3.org>
78. Teufel L.W., Rhett D.W., and Farrell H.E. Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the Ekofisk field, North Sea, // Proc. U. S. Rock Mechanics Symp., 32, 63-72, 1991.
79. USGS Earthquake Hazards Program: URL - http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0006y50#general_summary
80. Uthem T. et al. RTQUAKE, A Real-Time Earthquake Detection System Integrated with SEISAN //Seismological Research Letters. 2014. T. 85. №. 3. C. 735-742.
81. Van Eijs R., Mulders F., Nepveu M. et al. Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands // Environmental Geology. 2006. T. 84. T. 99-111.
82. Waldhauser F., Ellsworth W.L. HypoDD – A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations. US Geological Survey Open-File Report. – 113 p.
83. Weber B. et al. SeisComp3—automatic and interactive real-time data processing //Geophysical Research Abstracts. 2007. T. 9. C. 09219.
84. Wetmiller R.J., Earthquakes near Rocky Mountain House, Alberta, and relationship to gas production. // Can. Journ. of Earth. Sciences. 1986. v.32. (2). p.172-181.
85. Wikipedia: URL - <http://en.wikipedia.org/wiki/Sakhalin-I>
86. Wikipedia: URL - <http://en.wikipedia.org/wiki/Sakhalin-II>
87. Winston project page: URL - <http://volcanoes.usgs.gov/software/winston/>
88. Wittlinger, G., Etude de la sismicité en champ proche par un réseau sismologique à faible ouverture : application au Frioul (Italie) et au gisement de Lacq (France), Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 1980. 261 c.
89. Xen project wiki: URL - <http://www.xenproject.org/help/wiki.html>
90. Yerkes R. F., Castle R. O. Seismicity and faulting attributable to fluid extraction //Engineering Geology. – 1976. – T. 10. – №. 2. – C. 151-167.
91. Ylonen, T. The Secure Shell (SSH) Authentication Protocol. RFC 4252, 2006 / T. Ylo-nen, C. Lonvick. – URL: <http://tools.ietf.org/pdf/rfc4252>.
92. Zoback M., Zinke J. Production-induced normal faulting in the Valhall and Ekofisk oil fields. // Pure and Appl. Geophys. 159 (2002) 403–420.

93. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная. – М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.
94. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х томах / пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 880 с.
95. Акрамходжаев А.М., Ситдииков Б.Б., Бегметов Э.Ю. О возбужденном характере Газлийских землетрясений в Узбекистане // Узбекский геол. журнал. 1984. № 4. С. 17-19.
96. Алексейчик С. Н. и др. Тектоника, история геологического развития и перспективы нефтегазоносности Сахалина //Труды Всесоюз. нефт. науч. исслед. геол.-развед. ин-та. – 1963. – №. 217. – С. 265.
97. Аргентов В.В., Биккенина С.К., Жигулев В.В. и др. Экспериментальные исследования методом преломленных волн на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Структура и вещественный состав осадочного чехла Северо-Запада Тихого океана. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. IV. Южно-Сахалинск, 1997. С. 90-118.
98. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У. и др. Активные разломы Сахалина // Геотектоника. 2002. № 2. С.66-86.
99. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 42-28.
100. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.
101. Гаврилов А.В., Коновалов А.В., Никифоров С.П. Результаты полевых и стационарных испытаний регистратора сейсмических сигналов «Дельта 03» // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 18-28.
102. Гейликман М. Б., Писаренко В. Ф. О самоподобии в геофизических явлениях //Дискретные свойства геофизической среды/Отв. ред. МА Садовский. М.: Наука. 1989. С. 109-131.
103. Грассо Ж. Р., Ф. Волян; Д. Фурментро,В. Мори. Связь между извлечением углеводородов, локальными техногенными землетрясениями и крупными региональными землетрясениями на примере Пиренейского района. // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: Пер. с англ. и фр./Под ред. В. Мори и Д. Фурментро.-М.: Мир, 1994.-416 с.
104. Гупта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения. М.: Мир, 1979.- 251 с.

105. Дробот В.Д., Телегин А.Н. Изучение скоростных и волновых характеристик геологического разреза Северного Сахалина методом ВСП // Геологическая интерпретация сейсмических наблюдений в Дальневосточном регионе. Южно-Сахалинск, 1978. С. 79-84.
106. Зверев С. М., Тулина Ю. В. (ред.). Глубинное сейсмическое зондирование земной коры Сахалино-Хоккайдо-Приморской зоны. – Наука, 1974. 286 с.
107. Николаев А. В., Верещагина Г. М. Тонкая структура сейсмичности Средиземноморья и Центральной Европы // Докл. РАН. – 1993. – Т. 332. – №. 5. – С. 93-96.
108. Иващенко А.И., Кузнецов Д.П., Ким Чун Ун [и др.] Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. на Сахалине // Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. : инф. – аналит. бюл. ФССНиЗП , Экстренный вып., октябрь, 1995. – М . : Изд-во МЧС России и РАН, 1995. – С. 48-79.
109. Каталог землетрясений Сахалина за 2005 год // Землетрясения Северной Евразии 2005. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 465-470.
110. Коновалов А.В., Иващенко А.И. Многоканальный анализ кепстров для определения глубины очага мелкофокусного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 55-64.
111. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин / отв. ред. д-р геол.-мин. наук А.И. Кожурин. – Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2014, 252 с.
112. 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.
113. 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.
114. Коновалов А.В., Степнов А.А., Патрикеев В.Н. Организация автоматизированного рабочего места сейсмолога с использованием пакета сейсмологических программ SEISAN // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 4. С. 34-49.
115. Коновалов А.В., Сычев А.С. Калибровочная функция локальной магнитуды и межмагнитудные связи для Северного Сахалина // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 75-86.

116. Коновалов А. В. и др. Структура и особенности сейсмического режима очаговой зоны Такойского землетрясения 1 сентября 2001 г. (M w 5.2) // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26. – №. 2. – С. 93-101.
117. Кондратьев В.Н., Турунтаев С.Б. Лабораторное моделирование формирования и разрушения арочных конструкций над областям декомпрессии, возникающими при нефтегазодобыче // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1997, № 5, с. 32–41.
118. Костров Б. В. Сейсмический момент, энергия землетрясения и сейсмическое течение горных масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. №. 1. С. 23-40.
119. Красиков В.Н., Кононов В.Э., Пятаков Ю.В. Методика объемного моделирования по материалам сейсмогравиметрии с целью определения перспектив нефтегазоносности (на примере Северного Сахалина) // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах северо-западной окраины Тихого океана. Т. 1. Южно-Сахалинск, 2000. С. 167-201.
120. Маргулис Л.С., Мудрецов В.Б., Сапожников Б.Г. и др. Геологическое строение северо-западной части Охотского моря // Советская геология. 1979. № 7. С. 61-71.
121. Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области // М.: Наука, 1987. 95 с.
122. Мори В. Оседание буровых платформ на нефтяных промыслах Экофиск. // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: / Под ред. В. Мори и Д. Фурментро.-М.: Мир, 1994.-416 с..
123. Мори В., Грассо Ж. Р., Витличжер Ж. Газовое месторождение Лак (Франция): контроль за вызванным проседанием и влияние сейсмоактивности на газодобычу. // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. М.: Мир. 1994. 416 с.
124. Никифоров В.М., Альперович И.М., Гаврилов А.И. и др. Строение осадочной толщи Северного Сахалина (по данным МТЗ) // Тихоокеанская геология. 1987. № 3. С. 52-60.
125. Николаев А.В. О возможном влиянии разработки нефти на параметры Нефтегорского землетрясения // В сб. ФССН МЧС России. 1995.
126. Николаев А.В., Верещагина Г.М. Тонкая структура сейсмичности Средиземноморья и Центральной Европы // Докл. РАН. – 1993. – Т. 332. – №. 5. – С. 93-96.

127. Оскорбин Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 6. С. 154-178.
128. Пискулин В.А., Райзман А.П. О геодезических исследованиях деформаций земной поверхности в эпицентральных зонах Газлийских землетрясений 1976 - 1984 г.г. // 7-й Международный симпозиум по современным движениям земной коры, Таллинн, 8-13 сент. 1986 г.
129. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока) // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР (методические работы ЕССН). М.: Наука, 1989. С. 32-51.
130. Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
131. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
132. Регистратор сейсмических сигналов «дельта-03»: URL - <http://www.logsys.ru/index.php?page=15>
133. Ризниченко Ю. В. Энергетическая модель сейсмического режима //Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. №. 5. С. 3-9.
134. Сахалинский сейсмологический сервис реального времени: URL - <http://imgg.ru/ru/srss>
135. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Апробация вычислительно программы FOCMES для определения фокальных механизмов землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. №3. С. 102-117.
136. Сейсмологические таблицы. М.: ИФЗ АН СССР, 1962. С. 75-80.
137. Семенов Р.М., Павленов В.А. Некоторые макросейсмические последствия Нефтегорского землетрясения 1995 г. // Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. : инф. – аналит. бюл. ФССНиЗП , Экстренный вып., октябрь, 1995. – М . : Изд-во МЧС России и РАН, 1995. – С. 76-93.
138. Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 180 с.

139. Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В., Отемолер Л. Новая архитектура сбора, хранения и обработки сейсмологических данных // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С. 27-38.
140. Татевосян Р.Э., Шебалин Н.В. К проблеме представления информации о совокупностях землетрясений в задачах сейсмической опасности // Вопросы инженерной сейсмологии. 1985. № 26. С. 86.
141. Тихонов И. Н. Автоматическое определение азимута на эпицентр землетрясения с помощью ЭВМ по записи одной станции //Геология и геофизика. – 1975. – №. 5. – С. 105-111.
142. Тихонов И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 59-63.
143. Турунтаев С.Б., Горбунова И.В. О характере множественного разрушения в очаговой области Газлийских землетрясений // Изв. АН СССР, Физ. Земли. 1989. № 6. с.72-78.
144. Федотов С. А. и др. Уточнение границ очагов землетрясений с $M=7\frac{3}{4}$ свойств сейсмического цикла долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. 2014. №6. С. 52-67
145. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
146. Штейнберг В.В., Грайзер В.М., Иванова Т.Г. Землетрясение в Газли 17.У.1976 г. // Изв. АН СССР, Физ. Земли. 1980. №3.
147. Шурыгин А.М., Одинец М.Г. Долгосрочный статистический прогноз пространственно-временной плотности сильных землетрясений для Курильских островов //Вулканология и сейсмология. 1984. №. 6. С. 92-102.