

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

На правах рукописи

БОГИНСКАЯ НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА СЕЙСМИЧЕСКИХ
СОБЫТИЙ НА О. САХАЛИН ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ КАК ОСНОВА МЕТОДОВ СРЕДНЕСРОЧНОЙ
ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ LURR И СРП**

(25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
Закупин Александр Сергеевич
кандидат физико-математических наук

Южно-Сахалинск - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПОДГОТОВКЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ И АНОМАЛИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ.....	10
1.1 История катастрофических землетрясений мира за последние сто лет.....	10
1.2 Поиск предвестников землетрясений в геофизических полях и последовательностях сейсмических событий на Дальнем Востоке.....	12
1.3 Методики прогноза землетрясений на базе особенностей сейсмического режима в очагах сильных землетрясений при подготовке, развитии и релаксации.....	18
1.3.1 Форшоки землетрясений и сейсмическое затишье.....	19
1.3.2. Методы и алгоритмы среднесрочного прогноза землетрясений.....	21
1.3.3. Параметр b -value как характеристика сейсмического режима.....	24
Выводы по главе 1.....	29
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ МЕТОДАМИ LURR (LOAD-UNLOAD RESPONSE RATIO) И СРП (САМОРАЗВИВАЮЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ).....	30
2.1 История развития инструментальных сейсмологических наблюдений на Сахалине и современные возможности сейсмической сети СФ ФИЦ ЕГС РАН.....	30
2.2 Основы метода LURR и средства для проведения расчетов.....	33
2.2.1 Оригинальные алгоритмы и выбор параметров для анализа сейсмичности на о. Сахалин.....	33
2.2.2 Программный комплекс «Seis-ASZ» для анализа сейсмических последовательностей методом LURR (структура, назначение, опции).....	39
2.3 Основы метода СРП и средства для проведения расчетов.....	42
2.3.1 Программный комплекс «SeisDynamicsView» для анализа сейсмических последовательностей методом СРП (структура, назначение, опции).....	44
2.4 Физические основы для многостадийного подхода при изучении сейсмического режима методами LURR и СРП.....	46
Выводы по главе 2.....	49

ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ LURR И СРП ДЛЯ СЕЙСМИЧНОСТИ О. САХАЛИН ПО ДАННЫМ КАТАЛОГОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.....	51
3.1 Анализ сейсмичности о. Сахалин методом LURR.....	51
3.2 Метод СРП на примере Невельского землетрясения 2007 года	64
Выводы по главе 3.....	75
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ LURR И СРП ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА О. САХАЛИН	77
Выводы по главе 4.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	92

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Три самых разрушительных землетрясения за последние 30 лет на о. Сахалин (Нефтегорское 1995 г. с магнитудой $M=7.2$ на северо-востоке острова, Углегорское 2000 г., $M=7.0$ в центральной его части, и Невельское 2007 г., $M=6.2$ на юге) указали на более высокий уровень сейсмической опасности этого региона, чем это было предусмотрено в картах по общему сейсмическому районированию (8-9 баллов по шкале MSK-64 при $T=500$ лет) [Уломов, 1998]. Этими событиями было инициировано развитие сети сейсмических станций на о. Сахалин и организация полноценной сейсмологической службы в начале 2000-х годов. В 2011 году сеть Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук (СФ ФИЦ ЕГС РАН) стала полностью цифровой, а каталоги землетрясений получили высокую представительность за счет плотной сети (особенно на юге острова). Это способствовало более детальному исследованию сейсмического режима, включая разработку новых подходов к прогнозам землетрясений (ЗЛТ) и адаптации имеющихся методик для местных условий.

Исключительная сложность задачи прогноза предполагает определенную этапность ее решения. Для района северного Сахалина была показана возможность среднесрочного прогноза одной из самых трагичных катастроф в России - Нефтегорского ЗЛТ 1995 г. ($M_w=7.2$) с помощью алгоритма $M8$. Настройка алгоритма выполнялась на данных регионального каталога Геофизической службы РАН без афтершоков за последние 15 лет, начиная с 1964 г. [Тихонов, 2000].

В декабре 2005 г. сейсмологами Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) был подготовлен долгосрочный прогноз сильного ЗЛТ на юго-западном шельфе о. Сахалин с $M_{LN}=6.6\pm 0.6$. Основой прогноза послужили предвестники - сейсмические бреши первого рода и второго рода, которые были надежно картированы на юго-западном шельфе острова вблизи гг. Невельск, Холмск по историческим данным о сильных ЗЛТ и данным сети цифровых сейсмических станций на юге о. Сахалин. Началом его реализации явилось Горнозаводское ЗЛТ 17.08.2006 года с магнитудой $M_w=5.6$. Через 6 дней после его начала Тихоновым И.Н. и Ким Ч.У. был подготовлен среднесрочный прогноз более сильного события в этом районе. Примерно через год долгосрочный и среднесрочный прогнозы

полностью реализовались Невельским ЗЛТ 2.08.2007 г. с магнитудой $M_w=6.2$ ($M_{LH}=6.2$) [Тихонов, 2006; Тихонов, 2008].

Следуя логике стадийности сейсмического процесса в дополнение к среднесрочным (или скорее долгосрочным) методам оценки сейсмической опасности Тихонов И.Н. применил метод саморазвивающихся процессов (СРП), который описывает поведение разрушающейся системы на самой последней стадии [Малышев, 1991]. Ретроспективно было проведено моделирование по методу СРП для юга о. Сахалин на детальном каталоге землетрясений с $M \geq 2.6$ за 12-летний (2003-2014 гг.) период наблюдений для восьми ЗЛТ с $M \sim 4.6-6.2$. Для каждого из них получены даты реализации прогнозов. При этом ошибка прогноза во времени составила не более суток. Авторы отмечали, что реальная точность прогноза могла бы быть выше при наличии более детального ($M \geq 2.0$) каталога землетрясений, получаемого в реальном времени, по югу о. Сахалин [Тихонов и др., 2017].

После 2014 года на о. Сахалин произошло несколько сильных землетрясений, сейсмическая сеть обеспечила представительность каталогов землетрясений с $M > 3.0$ на севере и $M \geq 1.5$ на юге о. Сахалин. Улучшение регистрационных возможностей определяет перспективы для мониторинга сейсмической опасности в реальном времени. В настоящее время актуальным в этой связи является продолжение работы с уже известными методами прогноза землетрясений, а также внедрение новых методик и алгоритмов, ранее не применявшихся на Сахалине.

В настоящей работе показаны результаты исследований, которые дают возможность эффективного последовательного применения методов прогноза LURR (Load-Unload response ratio) и СРП, опирающихся на современные модели процесса разрушения геосреды.

Цель работы

Поиск устойчивых среднесрочных пространственно-временных закономерностей потока сейсмичности на о. Сахалин перед сильными землетрясениями, для разработки методологии и алгоритмов, сужающих временные рамки прогноза сейсмических событий.

В соответствии с этим решались следующие **задачи**:

2. Выбрать физические модели для исследования сейсмического режима в период подготовки сильных землетрясений с учетом тектонических и сейсмических особенностей о. Сахалин.
3. На основе выбранных моделей провести расчеты в основных сейсмогенерирующих областях о. Сахалин на имеющемся программном обеспечении, в которых за

выбранный период инструментальных наблюдений были зафиксированы землетрясения с $M \geq 5.5$.

4. По результатам расчетов выделить характерные этапы развития сейсмического процесса, основные точки перехода режима в различные состояния, временные пределы применимости методов и общие закономерности, позволяющие их последовательное применение в рамках разработанного алгоритма.
5. Оценить возможность применения предложенного алгоритма для прогноза сейсмической опасности на территории о. Сахалин.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Аномальные значения параметра LURR наблюдались на территории Сахалина в шести областях с линейными размерами не более 200 км за 1-2 года до сильных землетрясений ($M > 5.5$) в период с 1988 по 2017 гг.
2. Определены универсальные параметры для обработки сейсмических каталогов, при которых аномалии LURR не обнаружены в спокойные периоды, а в качестве предвестников зарегистрированы в 75% случаев (6 из 8 землетрясений с $M > 5.5$).
3. После появления предвестника LURR в течение 1-2 лет в сейсмическом процессе наблюдаются режимы с обострением (определяемые как саморазвивающиеся процессы), последний из которых реализуется от недели до 2.5 месяцев до сильного землетрясения, при том, что общее число таких режимов в 100% случаев не превышает двух.

Методы исследования

В данном исследовании использовался комплекс методов: последовательное применение методов LURR и СРП. Результаты в части выполнения расчетов по методу LURR получены с помощью программного комплекса «Seis-ASZ», который был разработан в ИМГиГ ДВО РАН [Закупин, 2016]. Для анализа данных каталогов ЗЛТ при помощи алгоритма СРП применялся программный комплекс «SeisDynamicsView», который был любезно предоставлен А.И. Малышевым из Института геологии и геохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН).

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложен подход для описания сейсмического режима в период подготовки сильных ЗЛТ на о. Сахалин. Данный подход показал большой процент успешных реализаций прогнозов за более чем 30-й период сейсмических наблюдений, как в ретроспективе, так и в реальном времени. Последовательно использованы методики оценки сейсмической обстановки на различных этапах подготовки сильных землетрясений LURR и СРП. Высокая степень реализации

прогнозов обусловлена тем, что настройка методик проводилась в ходе многолетней работы в режиме реального времени и адаптирована к региональным особенностям сейсмического режима о. Сахалин.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается использованием подходов и методов исследования, ранее апробированных и взаимно дополняющих друг друга (методы LURR и СРП); надежными алгоритмами обработки данных; согласованностью результатов с результатами работ других авторов по смежной тематике, а также подтверждением результатов, полученных ретроспективно при проведении компьютерного моделирования.

Обоснованность результатов подтверждается согласованностью и непротиворечивостью полученных результатов по отношению к более ранним исследованиям других ученых.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы для разработки аналитических систем по прогнозу сейсмической опасности на о. Сахалин.

Алгоритм, предложенный в данной работе, может быть положен в основу автоматизированного комплекса, работающего в системе автоматического сбора и анализа сейсмологической информации СФ ФИЦ ЕГС РАН на основе специализированных программных комплексов, которые прошли этапы настройки и длительного тестирования на данных каталогов ЗЛТ других регионов, как в ретроспективном, так и в реальном режимах обработки.

В настоящее время данная методология используется при выработке решения по сейсмической опасности на о. Сахалин на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (СФ РЭС). Практическая значимость исследований подтверждена результатами успешных реальных прогнозов последних сахалинских землетрясений: Онорского 2016 г. ($M_w=5.8$) и Крильонского 2017 г. ($M_w=5.0$) (протокол заседаний СФ РЭС № 3 от 11.05.2016, протокол заседаний СФ РЭС № 2 от 16.03.2017).

Работа выполнена в соответствии с научными темами и планами работ ИМГиГ ДВО РАН по государственному заданию (ответственный исполнитель); проектом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №18-07-00966 «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности о. Сахалин с применением сейсмических датчиков нового типа» (исполнитель).

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в подготовке сейсмических каталогов для проведения расчетов на выбранных компьютерных моделях на специализированном программном обеспечении.

Автором лично выполнены расчеты параметров LURR и СРП перед сильнейшими землетрясениями на о. Сахалин, начиная с 1988 года (с предысторией для каждого события в несколько лет).

Самостоятельно и вместе с соавторами участвовала в подготовке публикаций по теме работы, обобщению материала и формулировке выводов.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 7 – в изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией (из них 2 проиндексированы в реферативных базах Web of Science). По теме диссертации опубликовано 8 статей в сборниках материалов всероссийских и международных конференций.

Апробация работы. Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены на международных и всероссийских научных мероприятиях, в том числе:

1. XVII международной конференции по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ 15-17 июня 2017 г., г. Южно-Сахалинск;
2. V молодежной тектонофизической школе-семинаре 09-12 октября 2017 г., г. Москва;
3. VI научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 02-07 октября 2017 г., г. Петропавловск-Камчатский;
4. Международной юбилейной научной конференции посвященной 40-летию со дня образования научной станции РАН в г. Бишкеке 03-07 июля 2018 г., г. Бишкек;
5. III международной научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы» 27-31 мая 2019 г., г. Южно-Сахалинск;
6. V международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» 04-07 июня 2019 г., г. Москва.
7. VII научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 29 сентября - 07 октября 2019 г., г. Петропавловск-Камчатский;

8. X Юбилейной международной научной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», 1-5 октября 2019 г., с. Паратунка, Камчатский край.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 108 страницах, включает в себя 37 рисунков, 6 таблиц, 188 библиографических ссылок.

Благодарности. Автор выражает признательность и благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Закупину А.С. за постановку темы работы и общее руководство исследованиями на всех этапах. Искренне благодарю д.ф.-м.н. Богомолова Л.М. за конструктивные предложения и полезные советы при написании настоящей работы. Благодарю коллег из СФ ФИЦ ЕГС РАН и лично Левина Ю.Н. за обсуждение отдельных вопросов по теме диссертации. Автор благодарен соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми были получены интересные научные результаты: к.т.н. Каменеву П.А. и Костылеву Д.В. Автор признателен всем коллегам из ИМГиГ ДВО РАН, КФ ФИЦ ЕГС РАН, Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук и лично д.ф.-м.н. Завьялову А.Д., Института теории прогноза землетрясений Российской академии наук (ИТПЗ РАН) и лично д.ф.-м.н. Родкину М.В., которые оказали помощь ценными советами по улучшению диссертации.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПОДГОТОВКЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ И АНОМАЛИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ.

1.1 История катастрофических землетрясений мира за последние сто лет

На нашей планете каждый год происходит множество землетрясений, но не все из них обращают на себя внимание. Это могут быть и слабые толчки, и довольно сильные смещения. Однако сейсмические события часто происходят и в густонаселенных местах, а их последствия навсегда остаются тяжелым воспоминанием в истории. Но только в прошлом веке технологические способности достигли той точки, где можно полностью измерить воздействие подобного рода бедствий.

Ашхабадское землетрясение произошло в ночь с 5 на 6 октября 1948 года в городе Ашхабад (Туркменская ССР, СССР) с $M=7.3$. Интенсивность сотрясений составила 9-10 баллов по шкале MSK-64. В результате землетрясения в Ашхабаде было разрушено 90-98 % всех строений. По разным оценкам, погибло до 2/3 населения города [Сыдыков, 2016].

В Турции во время землетрясения в 1939 г. ($M=7.9$) в г. Эрзинджан погибло 40 тыс. человек. С тех пор в Турции произошло более 20 катастрофических землетрясений, унесших большое количество человеческих жизней. Самым разрушительным было землетрясение, произошедшее 17 августа 1999 г. ($M=7.7$). Его жертвами стали 14 тыс. человек [Медведева, 2019].

7 декабря 1988 года случилась трагедия в Армении. В результате землетрясения в развалины обратился город Спитак, наполовину разрушились Ленинакан, Кировакан и многие другие города, и села Армении. Рассыпались все блочные дома, похоронив под собой около 25 тысяч человек [Сыдыков, 2016]. Мощные подземные толчки за полминуты разрушили почти всю северную часть республики, охватив территорию с населением около 1 млн. человек. В эпицентре землетрясения - Спитаке - интенсивность толчков достигла 9-10 баллов (по 12-балльной шкале MSK-64) [Medvedev, 1964]. Подземные толчки ощущались в Ереване и Тбилиси.

Значительная часть территории России находится в сейсмоопасных зонах и может подвергаться землетрясениям различной силы. Дальний Восток, благодаря своему

географическому положению, занимает особое место среди других сейсмоопасных территорий России: на Камчатке, на Курильских и Алеутских островах, в области сочленения Североамериканской, Тихоокеанской и Охотской литосферных плит, возникают сильнейшие землетрясения, и высвобождается основная доля упругих напряжений. В зоне субдукции, где океаническая кора движется под материковую, происходят землетрясения с магнитудой до 9.0 потому интенсивность сотрясений на поверхности земли может достигать 10 баллов по шкале MSK-64, и даже выше.

1 сентября 1923 года 12-балльное землетрясение охватило область Южного Канто (включая Токио и Йокогаму). Сами японцы называют его «Великим землетрясением Канто». Первый толчок за несколько секунд полностью разрушил более сотни тысяч домов. Остальное довершили пожары. Землетрясение оставило без крова три с половиной миллиона человек и унесло 150 тысяч жизней. На Аляске 26 марта 1964 г. произошло одно из самых мощных землетрясений ($M=8.5$). Продолжительность главного толчка составила 4 мин. Разрушения охватили площадь более 65 тыс. км², погибло 130 человек. В результате образовавшегося цунами погибло еще 11 человек [Сыдыков, 2016].. 26 декабря у восточного берега индонезийского острова Суматра произошло одно из самых сильных и разрушительных землетрясений в современной истории. Приливная волна, вызванная этим землетрясением, обрушилась на побережье Шри-Ланки, Индии, Индонезии, Таиланда, Малайзии [Мухамедиев, 2006]. По различным данным, эта цифра составляет примерно 230 тысяч человек. Точное число погибших неизвестно, так как множество людей было унесено водой в океан. Землетрясение вызвало цунами, ставшее самым смертоносным в современной истории. Магнитуда землетрясения составила, по разным оценкам, от 9.1 до 9.3. Землетрясение у восточного побережья острова Хонсю в Японии с $M_w=9.1$ произошло 11 марта 2011 года восточнее острова Хонсю, в 130 км к востоку от города Сендай и в 373 км к северо-востоку от Токио. Землетрясение вызвало сильное цунами, которое произвело массовые разрушения на северных островах японского архипелага. Цунами распространилось по всему Тихому океану; во многих прибрежных странах, в том числе по всему тихоокеанскому побережью Северной и Южной Америки от Аляски до Чили, было объявлено предупреждение.

На о. Сахалин, а также в Приморье и Приамурье преобладает коровая сейсмическая активность, при которой землетрясения происходят в земной коре, и потому они не такие сильные, как в области сочленения литосферных плит. Но эпицентры этих землетрясений порой располагаются прямо под населенными пунктами, из-за чего относительно слабые толчки могут привести к разрушению зданий и гибели людей.

1.2. Поиск предвестников землетрясений в геофизических полях и последовательностях сейсмических событий на Дальнем Востоке

Анализ микросейсмического шума. Переход разломной зоны в метастабильное состояние

С развитием региональных сейсмических сетей стали активно пытаться оценивать состояние геосреды по параметрам регистрируемого микросейсмического шума; в том числе и с точки зрения поиска предвестников сильных землетрясений.

Так, по данным широкополосной 0.0028-5 Гц станции «Петропавловск» (IRIS) перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г. $M_w=7.7$ были обнаружены периодические вариации микросейсмического фона в диапазоне 10-100 минут [Соболев, 2004].

На Камчатке, на основании экспериментально обнаруженного эффекта стабилизации фазы приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) при подготовке сильного землетрясения [Салтыков, 2014, 2015; Салтыков, 2016] предложена методика прогноза сильных землетрясений. [Салтыков, 2017] демонстрирует, что перед сильным региональным землетрясением упорядочивается отклик ВСШ на приливные воздействия, т.е. сдвиг фазы, который наблюдался между выбранной волной приливного гравитационного потенциала (в настоящее время используется волна O_1 с периодом 25.82 часа) и выделенной из рядов огибающей ВСШ, становится устойчивым. Причем стабилизация такого сдвига должна наблюдаться не менее трех недель. В этом случае прогнозируются землетрясения с магнитудой $M \geq M_0=5.0$ на глубине до 300 км (рисунок 1.1). Предельное эпицентрально расстояние R связано с ожидаемой магнитудой M эмпирическим соотношением $lgR = (M+3.64)/4.06$. При отсутствии ожидаемого землетрясения (ситуация квалифицируется как ложная тревога) тревога снимается через две недели после окончания стабилизации фазы. Описанная методика в течение многих лет применяется на Камчатке.

Авторы методики [Салтыков, 2017] утверждают, что надежность предвестника растет с увеличением магнитуды прогнозируемого землетрясения. При прогнозировании землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ надежность составляет 0.8 (т.е. 80% землетрясений имели предвестник), а достоверность – 0.2 (т.е. реализованы 20% выявленных предвестников); при этом результаты применения прогностической методики статистически значимо отличаются от случайного угадывания и дают по сравнению с ним выигрыш в 2.8 раза (для $M \geq 6.0$).

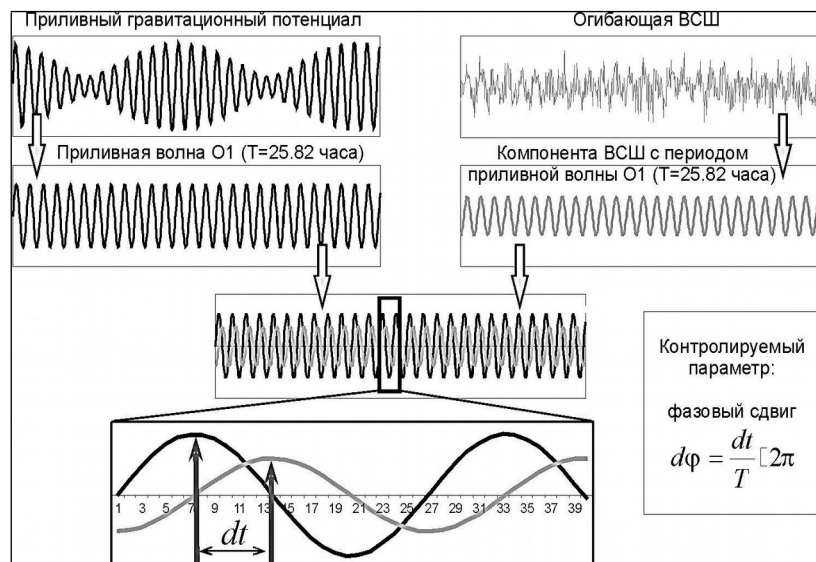


Рисунок 1.1 – Схема определения контролируемого параметра – фазового сдвига между волной *O1* приливного гравитационного потенциала и выделенной из рядов огибающей ВСШ гармоникой с соответствующим приливным периодом [Салтыков, 2016]

Интересно, что на данный момент обнаруживается разделение отклика на субдукционные и коровые землетрясения по значению $\Delta\varphi$ [Предвестники сильных..., 2008; Специализированная..., 2009]. Точки располагаются на круговой диаграмме (рисунок 1.2) неравномерно. Единственное землетрясение, попавшее в заштрихованную область, – сильнейшее коровое землетрясение на суше Камчатки за годы инструментальных наблюдений Карымское землетрясение 01.01.1996 г. с $M_s=6.9$ [Левина и др., 2002]. Оценка вероятности появления менее двух точек в заштрихованном секторе при гипотезе о равномерном распределении $\Delta\varphi$ на окружности дает величину менее $3 \cdot 10^{-3}$, то есть полученное распределение следует считать неравномерным.

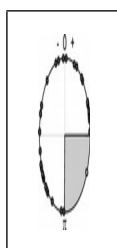


Рисунок 1.2 – Круговая диаграмма значений параметра $\Delta\phi$ по данным станции «Начики», зафиксированные перед сильными камчатскими землетрясениями 1992–2010 гг. Землетрясение, попавшее в заштрихованный сектор – сильнейшее историческое коровое землетрясение Камчатки (Карымское землетрясение)

Предположения о том, что при переходе очаговой области будущего землетрясения в метастабильное состояние механические характеристики разломной зоны должны существенно изменяться, были подтверждены в лабораторных экспериментах [Hedayat et al., 2014; Кочарян, 2016]. В них было показано, что именно снижение жесткости модельного разлома при переходе в метастабильное состояние обуславливает начало ускоренного крипа, предшествующего динамическому событию. Спектральный анализ возбуждаемых в лабораторной системе «блок-разлом» микроколебаний позволяет обнаружить моду её собственных колебаний, спектральный центроид которых существенно снижается при переходе в метастабильное состояние [Kocharyan et al., 2018] (рисунок 1.3).

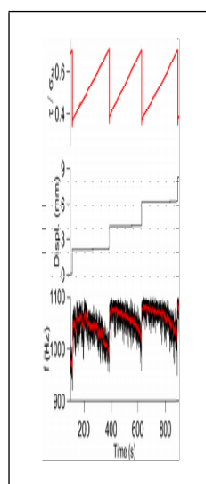


Рисунок 1.3 – Эффект снижения спектрального центроида перед срывом в лабораторном эксперименте [Kocharyan et al., 2018]

В последние несколько лет на Сахалине заметно активизировались несколько сейсмоактивных зон [Local Occurrence..., 2018]. Несомненно, это вызывает беспокойство общества, так как ещё свежи в воспоминаниях трагедии в Нефтегорске (1995 г., $M_w=7.2$) и Невельске (2007 г., $M_w=6.2$). Материальный ущерб от Нефтегорского землетрясения составил более 4 млрд. рублей. Более умеренное по силе Невельское землетрясение 2007 г., разрушило г. Невельск, что привело к

материальному ущербу в сумме более 6 млрд. рублей. Несмотря на это, работы российских и зарубежных исследователей в очень важном направлении долгосрочных и среднесрочных оценок сейсмической опасности на Дальнем Востоке, в основном, связаны с Камчаткой и Курильскими островами. Например, долгосрочный прогноз академика С.А. Федотова, в основе которого положены уточненные им закономерности размещения в пространстве и времени сильнейших землетрясений ($M \geq 7.0-7.5$) Курило-Камчатской сейсмоактивной зоны и северо-восточной Японии. Длительность сейсмического цикла в этой зоне по Федотову составляет 140 ± 60 лет [Федотов, 1968].

Определенные успехи в долгосрочном прогнозе землетрясений были достигнуты с помощью алгоритма М8. Алгоритм М8 разработан в ИТПЗ РАН, Москва акад. В.И. Кейлис-Бороком и В.Г. Кособоковым. За время использования алгоритма (с 1991 г.) были предсказаны: Шикотанское землетрясение 1994 г. и Итурупское 1995 г. [Keilis-Borok et al., 1990].

Ещё один пример – алгоритм Q1, в котором используется ряд пространственно-временных и энергетических закономерностей изменения отдельных параметров сейсмического режима, установленных на интервалах времени между землетрясениями с $M \geq 7.5$. Данный алгоритм тестировался на южных Курильских островах и северо-восточной части Японии [Тихонов, 2005], он оправдал себя в случае Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. на Камчатке [Матвиенко, 1998]. Для мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011 г. среднесрочные прогнозы были составлены как по этим [Кособоков, 2011; Родкин, 2013], так и по другим алгоритмам [Любушин, 2011].

Методика расчета прогностического параметра RTL основана на выделении аномалии сейсмического затишья по трем характеризующим сейсмический режим функциям: эпицентральной R, временной T и энергетической L, была предложена Соболевым Г.А. и Тюпкиным Ю.С. [Соболев, 1996]. Данная методика позволяет выявить зоны формирования сейсмических затиший, определяемые как области с отрицательными значениями параметра RTL. Методика ориентирована на сильные землетрясения ($M \geq 7.0$). Землетрясение происходит, как правило, на краю аномалии в интервале до трех лет после выхода RTL из минимума. Исследования с применением метода RTL проводились на Камчатке [Sobolev, 2001].

Оригинальные работы были проведены исследователями с помощью мультипараметрического анализа предвестников землетрясений [Wu et al., 2015]. В

соответствии с моделью литосферно-атмосферно-ионосферной связи (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling model (LAIC)), тепловой поток приводит к повышению температуры, влажности и перепаду давления, и, наконец, изменениям линейной скорости, когда воздушная струя (jet) проходит через область над будущим эпицентром. Используя спутниковое наблюдение, авторы [Wu et al., 2015] попытались определить возможные атмосферные возмущения в поверхностном скрытом тепловом потоке (surface latent heat flux (SHLF)), метеорологических особенностях и изменении скорости потока перед мощнейшим землетрясением в Непале 2015 г. с $M_w=7.8$ и на Тайване 2015 г. с $M_w=6.6$. Чтобы подкрепить эти наблюдения, авторами также выполнено численное моделирование динамики сейсмического режима [Wu et al., 2015].

Исследования аномального поведения некоторых геофизических параметров в качестве краткосрочных предвестников на Дальнем Востоке также традиционно связаны с сейсмически активными зонами (п-ов. Камчатка и Курильские острова). Можно привести примеры некоторых таких работ. В работе [Наблюдения слабых..., 2012], были выполнены гидроакустические наблюдения и изучены связи регистрируемых сигналов со слабой сейсмичностью в районе Южных Курильских островов. Заметной корреляции между геоакустической эмиссией и слабыми землетрясениями выявлено не было. Предположение о существовании перед слабыми землетрясениями низкочастотного упреждающего сигнала (сейсмоакустический отклик на подвижку геологического массива перед сейсмическим разрывом) также не нашло подтверждений. Вместе с тем, проведенные на Камчатке исследования ГАЭ в приповерхностных слоях позволили обнаружить наличие краткосрочных акустических предвестников [Марапулец и др., 2012; Акустические и электромагнитные..., 2017]. Успешный прогноз сильнейшего Жупановского землетрясения (30 января 2016 г., $M_w=7.2$) на эпицентральной дистанции 107 км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км был сделан по данным непрерывных комплексных скважинных измерений ГАЭ (Петропавловск-Камчатский геодинимический полигон, мониторинг с 2000 года). Регистрация осуществлялась на границе эпицентральной зоны этого сильнейшего землетрясения и, по мнению авторов прогноза [Успешный прогноз..., 2017], указанное обстоятельство позволило получить удовлетворительный результат.

Здесь же (Камчатка) была применена методика прогноза землетрясений, основанная на эффекте модуляции высокочастотного сейсмического шума (ВСШ)

земными приливами [Салтыков, 2017]. На основе обширного экспериментального материала 1996–2013 гг. показано, что результаты применения прогностической методики статистически значимо отличаются от случайного угадывания. Вывод получен на каталоге, содержащем 68 землетрясений прогнозируемого диапазона магнитуд $M \geq 5.0$. Изучение гидрогеологических предвестников на Камчатке и разработка на их основе способов сейсмического прогноза представлено в [Копылова, 2018]. Методика имеет региональную привязку и может применяться для определения времени и места сильных землетрясений Камчатки. Авторами «по данным наблюдений на скважине были осуществлены заблаговременные среднесрочные прогнозы времени ряда сильных землетрясений 2004–2016 гг. включая землетрясение 28.02.2013 г. и Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. со временем упреждения от первых суток до одного месяца».

На Камчатке были также проведены исследования сейсмичности на базе эффектов в ионосферной плазме с помощью французского спутника ДЕТЕТЕР. Данные очень низкочастотных и низкочастотных (ОНЧ/НЧ) наблюдений, полученные на французском спутнике ДЕТЕТЕР и на наземной станции в г. Петропавловск-Камчатский, были использованы для совместной диагностики ионосферных возмущений в периоды сильной сейсмической активности в регионе Курильских островов и Японии в течение 2004–2010 гг. [Совместный анализ..., 2013]. В работе [Нейросетевая методика..., 2016] предлагалась методика прогнозирования сейсмических событий по ОНЧ/НЧ сигналам (очень низкочастотные и низкочастотные сигналы в диапазоне 10–50 кГц) с помощью нейросетевого подхода, а именно метода обратного распространения ошибки (МОРО), который подразумевает два основных этапа решения задачи – обучение и распознавание (собственно, прогноз). По результатам проведенных исследований авторы сделали вывод об эффективности использования нейросетевого подхода для краткосрочного прогноза землетрясений, начиная с магнитуды $M \geq 5.5$, по изменениям в амплитудах и фазах НЧ сигналов за ночной период времени с использованием данных по одной радиотрассе. В то же время практического применения эти работы не нашли и ни одного прогноза в режиме оперативного слежения сделано не было. Попытки таких исследований предпринимались и на о. Сахалин [Tsunami-induced..., 2012; Meteorological effects..., 2014], но, к сожалению, не дали положительного результата.

Некоторые исследования по теме прогноза имели место и на о. Сахалин. На юге острова проводились экспериментальные исследования, направленные на изучение

характера временных изменений естественных геофизических полей над залежью газа, расположенной в зоне влияния активного регионального разлома, а также выявления связи этих изменений с сейсмичностью [Признаки подготовки..., 2016]. Авторами был сделан вывод, что в отношении прогноза сейсмических событий наиболее информативны данные, о вариациях естественного электрического поля. При ретроспективном анализе сделано заключение о возможности определить время сейсмического события за несколько часов до его реализации (так называемый оперативный прогноз, [Признаки подготовки..., 2016]). Методические трудности данной работы являются очевидным барьером для перехода к оперативным прогнозам в реальном времени.

1.3. Методики прогноза землетрясений на базе особенностей сейсмического режима в очагах сильных землетрясений при подготовке, развитии и релаксации

Исследования в области прогнозирования землетрясений проводятся уже более 100 лет. Весьма обширный поиск на базе огромного фактического материала до сих пор не позволил найти надежные предвестники землетрясения или разработать методы, позволяющие уверенно и точно предсказать место и время сильного события.

В 1970-е годы ученые верили, что скоро будет найден практический метод предсказания землетрясений, но к 90-м годам повторяющиеся неудачи заставили многих сомневаться, возможно ли это в принципе. Большая часть анализа предвестников была выполнена на ограниченных выборочных данных или вообще ретроспективно, т.е. аномалия была выявлена после землетрясения, а уровень надежности прогнозов составляет величину около 50-60 %, близкую к случайной.

Хотя достаточно большая часть научного сообщества до сих пор считает, что с учетом комплексирования разных данных и методов прогнозирования, а также при условии достаточных ресурсов для получения широкого спектра сейсмических и геофизических данных прогнозирование все же возможно.

Встречающиеся аномалии (или, точнее, отклонения сейсмических или геофизических данных от того, что представляется нормой), которые можно считать предвестниками землетрясений, условно можно разделить на две категории. Это физические предвестники или данные, выявленные на основе непосредственных прямых наблюдений (излучение радона, гидрогеологические сигналы, оценка приливных

воздействий и т.д.) [Development..., 2001]. Либо статистические модели (в первую очередь модели сейсмичности), основанные на анализе каталогов землетрясений [Wyss, 1988].

С точки зрения оценки сейсмической опасности прогнозирование землетрясений делят на группы: долгосрочный (на год или несколько лет вперед) и среднесрочный и краткосрочный прогноз (на месяцы, недели или даже часы вперед). В этой градации предвестники чаще всего будут иметь отношение к среднесрочному и краткосрочному прогнозу, а статистические модели – к долгосрочному прогнозу.

1.3.1 Форшоки землетрясений и сейсмическое затишье

Один из «исторических» предвестников землетрясений – форшоки, т.е. увеличение количества сейсмических событий перед основным толчком. Согласно [Рикитаке, 1979] в классической японской литературе упоминания о подобных сообщениях встречаются довольно часто: местные жители начинали ощущать толчки, слышать гул из-под земли или звуки подобные взрывам, исходящие из недр за несколько дней, а иногда и за несколько часов до сильного землетрясения.

С повсеместным развитием сейсмических наблюдений форшоковую активность стали рассматривать как один из признаков подготовки землетрясений [Cicerone, 2009]. Форшоковая деятельность является одним из главных источников информации о геофизических процессах, происходящих в локальном участке земной коры перед тем, как произойдет основной толчок.

Японский сейсмолог К. Моги рассматривал вопросы миграции сейсмической активности, закономерности поведения сильных землетрясений, а также связи между мелкофокусными и глубокофокусными землетрясениями [Mogi, 1968, 1969, 1973, 1974; Моги, 1976, 1988]. В процессе изучения пространственно-временных распределений землетрясений различных регионов, К. Моги пришел к выводу, что причиной проявления сейсмичности в той или иной области в разное время является цикличность активных и неактивных периодов.

1. Неактивный, характеризующийся низким уровнем напряжения в виду предыдущего сильного события или, по-другому, фоновое напряжение;
2. Появление зоны затишья и кольцевой сейсмичности;
3. Появление форшоков;
4. Проявление главного события;
5. Афтершоковый процесс;
6. Период активности на обширной территории вокруг очаговой области.

Развитие первых двух этапов занимает достаточно длительное время. В таких случаях важными индикаторами приближающегося сильного землетрясения являются форшоки. К.Моги разделил сейсмичность до главного толка на несколько групп: слабые толчки, происходящие непосредственно перед событием в окрестности эпицентра; глубокофокусные толчки, возникающие в отдаленных местах от очага; зоны сейсмического затишья в очаговой области; проявление роев землетрясений; возрастание напряжения и активности в коре на обширной территории вокруг очаговой области [Родина, 2013].

На примере некоторых крупных землетрясений К.Моги установил пространственно- временную связь между сильными коровыми землетрясениями и их отдаленными глубокофокусными форшоками. В работе [Mogi, 1973] приводятся примеры сильнейших коровых землетрясений, для которых отмечались глубокофокусные толчки до и после главного события.

Для Японии, например, [Mogi, 1973] установил районы, в которых землетрясения очень часто сопровождаются форшоками. Это Идзу-Нагано, пересекающая центральную часть о.Хонсю; Миёси-Хамада, префектура Северная Хиросима и префектура Симане в области Тюгоку, западная часть о.Хонсю; Оита-Кумамото-Нагасаки в северной части о.Хонсю и Хиуганада – в море восточнее о.Хонсю.

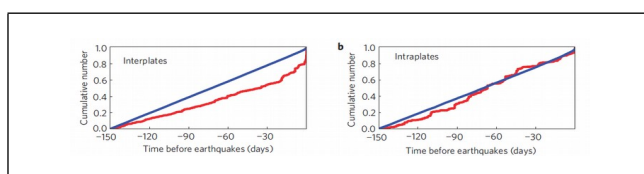


Рисунок 1.4 – Эволюция кумулятивного числа сейсмических событий (красная кривая) перед сильным землетрясением для (а) межплитных и (б) внутриплитных землетрясений. Синяя кривая показывает соответствующую симуляцию последовательности афтершоков [The long precursory..., 2013]

Анализ распределения форшоковой активности для выборки, состоящей из событий с $M > 3.0$ из каталога JMA с 1977 по 1997 года с форшоками на эпицентральной расстоянии до 50 км, показал, что наблюдается увеличение частоты появления форшоков перед основным событием [Maeda, 1999]. Такое поведение характерно для событий, происходящих в зонах субдукции, по сравнению, например, со сдвиговыми событиями [Reasenberg, 1999].

Описание обратного явления — сейсмического затишья (seismic gap) — впервые было приведено в работах [Федотов и др., 1965; Mogi, 1969; Kelleher, 1970; Kelleher et al., 1973]. Предполагается, что области затиший возникают в зонах разрывов будущих сильных землетрясений за несколько лет до момента толчка; причем в некоторых из них отмечается зависимость между размерами зоны затишья и величиной последующего землетрясения. [Atkinson, 1981]. На основе анализа публикаций по прогнозу и предвестникам землетрясений считал, что сейсмические затишья являются наиболее перспективными предвестниками.

Сейсмическое затишье – это уменьшение активности слабых и умеренных землетрясений по сравнению с фоновым уровнем сейсмичности во времени в районе подготовки очаговой области [Романенко, 2017]. Изучению сейсмических затиший и активизаций, которые наблюдались перед некоторыми землетрясениями, посвящен ряд работ. Для выделения областей и временных интервалов сейсмического затишья по сравнению с фоновым уровнем сейсмической активности существуют несколько методов, такие как Z-тест [Wyss, 1988; Салтыков, 2000; Тихонов, 2005], алгоритм RTL [Соболев, 1996, 1998; Соболев и др., 1996] и метод SEQ (Seismic Energy Quiescence) [Дядьков, 2008].

1.3.2. Методы и алгоритмы среднесрочного прогноза землетрясений

Метод Z-тест позволяет определять сейсмические затишья как статистически значимое уменьшение скорости потока землетрясений в ограниченном объеме среды и оценивать их количество [Wyss, 1986; Wyss, 1988; Wiemer, 1994; Салтыков, 2000; Тихонов, 2005]. В основу анализа заложена функция Z-тест, относящаяся к статистическим средствам проверки гипотез. Количественно затишье характеризуется значениями Z (статистическая значимость), SRD (уменьшение скорости сейсмического потока) и длительностью затишья dT . Аномалии (сейсмическому затишью) отвечает статистическая значимость $Z > 3$, что соответствует не менее чем 99% надежности выделения аномалии [Aki, 1965; Мого, 1988; Завьялов, 2006; Коновалова, 2010; Spatial and temporal..., 2012; Параметрическое..., 2013].

Параметр RTL представляет собой произведение трех функций: эпицентральной R , временной T и функции размера очага L [Соболев, 1996, 1998; Соболев и др., 1996]. В результате лабораторных экспериментов [Соболев, 1993], в соответствии с которым стадии сейсмического затишья и активизации последовательно сменяют друг друга в

очаге будущего землетрясения, был разработан широко распространенный впоследствии метод RTL. Значение параметра RTL в точке с координатами (x, y) на момент времени t вычисляется авторами методики [Соболев и др., 1996] на основе данных о землетрясениях, произошедших в пространственно-временной окрестности $[r_{\max}, t_{\max}]$, определяемой условиями:

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \leq r_{\max}, \\ 0 &\leq t - t_i \leq t_{\max}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Здесь (x_i, y_i) – это координаты эпицентра, а t_i – время его возникновения.

Параметр RTL представляет собой произведение эпицентральной R , временной T и размерной L (функции размера очага) функций.

$$\begin{aligned} R(x, y, z, t) &= \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_s, \\ T(x, y, z, t) &= \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t - t_i}{t_0}\right) \right] - T_s, \\ L(x, y, z, t) &= \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{l_i}{\eta}\right)^p \right] - L_s. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Суммирование ведется по всем n землетрясениям, попавшим в область $[r_{\max}, t_{\max}]$; коэффициент r_0 характеризует степень ослабления влияния текущего землетрясения в зависимости от расстояния r_i до прогнозной точки, т.е. до точки, для которой рассчитывается значение параметра RTL. Коэффициент t_0 характеризует степень «забывания» влияния предыдущих землетрясений по мере их удаления во времени от момента прогноза t . Величина l_i представляет собой длину разрыва в очаге i -го землетрясения. Показатель степени p характеризует вклад каждого из произошедших землетрясений. Если $p = 1$, то вклад пропорционален отношению длины разрыва к расстоянию гипоцентра i -го землетрясения до прогнозной точки. При $p = 2$ или $p = 3$ вклад пропорционален отношениям соответствующих площадей; при $p = 0$ вклад каждого произошедшего землетрясения не зависит от длины его разрыва [Параметрическое..., 2013].

Применение метода RTL для поиска аномалий в сейсмическом режиме показало достаточно высокую чувствительность по отношению к многолетним вариациям уровня фоновой сейсмичности. Один из примеров прогноза, выполненного методом RTL, приведен на рисунке 1.5.

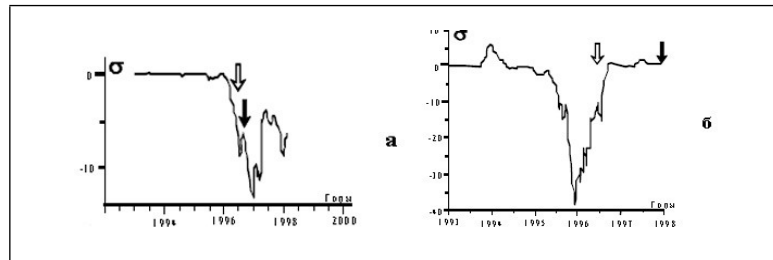


Рисунок 1.5 – Графики *RTL* перед двумя сильными землетрясениями Камчатки в 1996-1997 гг. а) 21 июня 1996 г., $M=7.1$; б) 5 декабря 1997 г., $M=7.7$. Белые стрелки указывают время подачи прогнозного извещения, черные стрелки соответствуют моментам возникновения сильных землетрясений [Параметрическое..., 2013]

Методом SEQ (Seismic Energy Quiescence) основан на выделении дефицита сейсмической энергии. Основным отличием данной методики от методик Z-тест и RTL является выделение аномалий сейсмической энергии относительно некоторого энергетического фонового уровня [Дядьков, 2008].

Алгоритм M8 получил свое название по причине того, что его разработка и первая ретроспективная апробация относится к задаче прогноза катастрофических землетрясений с магнитудой $M \geq 8.0$. Данный алгоритм разработан в Международном институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики (МИТП РАН г. Москва) [Кейлис-Борок, 1986; Keilis-Borok, 1990]. Алгоритм M8 позволяет производить диагностику периодов повышенной вероятности (ППВ) сильных ($M \geq M_0$) землетрясений для выбранного участка сейсмоактивной области по набору некоторых функций общего потока основных толчков (без афтершоков). Наблюдаемый поток нормализуется с помощью задания $\underline{M}$ (N_a) нижнего порога по магнитуде таким образом, чтобы обеспечить стандартное значение среднегодового числа землетрясений (N_a), которое принимается равным либо 20 (большая статистика), либо 10 (малая статистика). Значения прогнозных функций рассчитываются в скользящем временном окне ($t - s$, t) для сейсмических событий с M в диапазоне магнитуд $\overline{M}$, $\underline{M}$.

Алгоритм M8 ориентирован на прогноз сильных ($M \geq 7.5$) землетрясений в разных регионах мира. В июле 1991 г. совместно с американскими учеными был начат тестовый эксперимент в режиме реального времени в пределах Тихоокеанского сейсмического пояса на основе глобального каталога землетрясений NEIC GHDB [Global Hypocenters Data ..., 2004] [Проверка алгоритма ..., 1992; Healy et al., 1992; Кособоков, 1993]. Всю зону покрыли 147 круговыми областями с радиусом 427 км. Пополнение и обработка

данных осуществлялась раз в 6 месяцев. Текущий прогноз вперед вырабатывался независимо в трех научных учреждениях. В результате, в ходе данного эксперимента из 11 происшедших, сильных землетрясений было успешно предсказано 6 событий, в том числе, Шикотанское 1994 г. и Итурупское 1995 г. землетрясения [Заблаговременный ..., 1996; Precursory changes ..., 1994].

1.3.3. Параметр *b*-value как характеристика сейсмического режима

В настоящее время выявлено большое количество случаев закономерного изменения некоторых параметров сейсмического режима в период подготовки сильных землетрясений. Например, в работе В. И. Мячкина [Мячкин, 1978] указывается на возможное изменение перед сильными землетрясениями угла наклона графика повторяемости, уровня сейсмической активности, суммарной энергии слабых толчков, количества высвобожденной деформации и других показателей.

Одной из важнейших характеристик сейсмического режима является график повторяемости. Известно, что средний долгосрочный режим может быть отображен статистической функцией распределения частоты возникновения землетрясений по магнитуде, т.е. графиком повторяемости. Распределение количества землетрясений по энергии характеризует график повторяемости. Линейное соотношение, которое характеризует повторяемость землетрясений, записывают в форме закона Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, 1954]:

$$\lg N = a - bM, \quad (1.3)$$

где N - число землетрясений с магнитудой M и более, ΔN – число землетрясений в интервале магнитуд ΔM , константа a характеризует сейсмическую активность исследуемого региона, b – величина, отражающая соотношение слабых и сильных землетрясений. Параметр a в выражении (3) соответствует сейсмической активности оцениваемого объема, а b это обратный наклон линейной части распределения Гутенберга-Рихтера (графика повторяемости) в двойном логарифмическом масштабе (поскольку M это тоже логарифмическая величина), так называемая величина «*b*-value». Сейсмическая активность a и наклон b являются одними из основных параметров сейсмического режима.

Многими авторами были предложены различные численные методы измерения величины b и ее доверительных интервалов [Aki, 1965; Utsu, 1965; 1992; Гусев, 1974; Shi, 1982; Bender, 1983; Frohlich, 1993]. Некоторые из них говорят о возможности изменения скейлинга в конце графика повторяемости в области больших магнитуд, например,

[Lomnitz-Adler, 1979; Anderson, 1983; Kagan, 1993; 1994; 1997; Utsu, 1999; One slope..., 1999; Main, 2000]. В выборе способа построения графика повторяемости предпочтение отдается кумулятивному графику, поскольку этот вариант лишен недостатков, свойственных гистограммам (в частности, произвола в выборе интервалов разбиения) [Коновалова, 2008]. Одним из свойств наклона графика повторяемости является его непостоянство во времени. Среднеквадратичная ошибка в определении наклона графика повторяемости обратно пропорциональна квадратному корню из числа используемых для его определения землетрясений, поэтому для уменьшения ошибки необходимо увеличивать объем выборки [Коновалова, 2008].

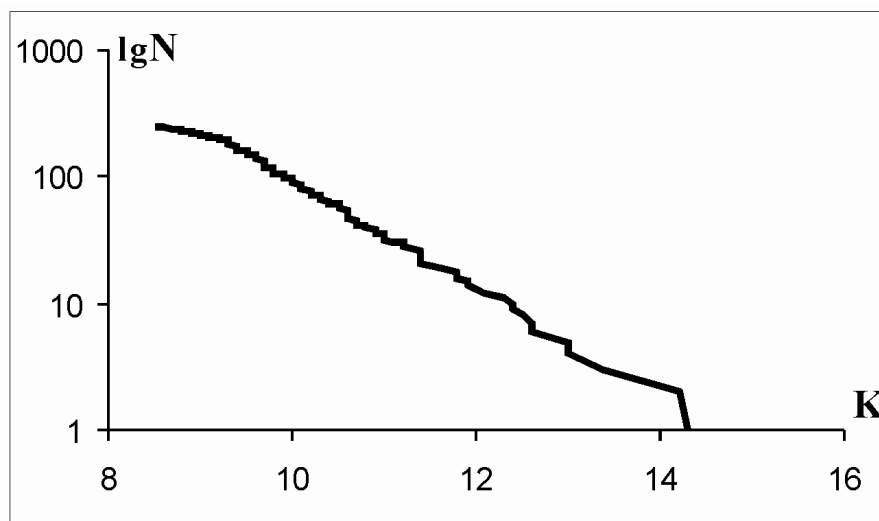


Рисунок 1.6 - Пример кумулятивного графика повторяемости

Неполнота сведений является основным фактором в вопросе возможной нелинейности графика повторяемости на правом и левом склонах, как для самых слабых, так и для сильнейших сейсмических событий. О сильнейших событиях судить сложно в силу их небольшого количества за все периоды инструментальных наблюдений, поэтому здесь принята гипотеза увеличения крутизны наклона графика повторяемости по мере приближения к некоторой предельной магнитуде ($M_{\max}$), принимаемой, как правило, из истории сейсмических катастроф в доинструментальный период времени в данном месте [Лукк, 2012]. Что касается слабых сейсмических событий, то здесь важно установить точную оценку минимальной представительной магнитуды. Сложность такого установления в том, что характеристика данной магнитуды в большинстве каталогов будет меняться в зависимости от того, какое количество регистрирующей аппаратуры установлено в том или ином регионе, а также от методов анализа и интерпретации

данных. Чем более развита регистрирующая сеть, тем более надежным будет являться показатель b -value. Эта величина (речь идет о минимальной представительной магнитуде) практически не постоянна во всех существующих каталогах и зависит, как от конфигурации и чувствительности сети сейсмологических наблюдений, так и от местоположения очагов землетрясений относительно этой сети [Смирнов, 1997; Wiemer, 2000; Завьялов, 2006; Mignan, 2012].

Для расчетов b -value наиболее часто используются три способа. В первом способе определяется наклон линии регрессии, рассчитываемой по методу наименьших квадратов например, в [Draper, 1981; Lopez-Pineda, 2005]; второй способ – это метод максимального правдоподобия по К. Аки [Aki, 1965]; третий способ опирается на модифицированный метод максимального правдоподобия для группированной выборки по [Куилдорф, 1966], который предложил использовать в сейсмологии А. Гусев [Гусев, 1974] и активно применявшийся в работах [Соболев, 1993; Завьялов, 2006; Papadopoulos, 2009; Попандопуло, 2011]. Большинство исследователей для определения параметра b используют метод предложенный [Aki, 1965] и одновременно с ним [Utsu, 1965].

В связи с важностью данной величины было разработано большое количество различных методов и алгоритмов для ее определения [Rydelek, 1989; Gombert, 1991; Kijko, 1992; Смирнов, 1997; Wiemer, 2000; 2002; Woessner, 2005; Papadopoulos, 2009; Mignan, 2012].

Для вычисления угла наклона графика повторяемости b -value и минимальной представительной магнитуды M_c сотрудниками Института физики Земли РАН были предложены алгоритм и программа *FastBee*, написанная на языке C++ Borland Builder, как инструмент быстрой и удобной визуализации основных параметров сейсмичности и их временных рядов (Papadopoulos, 2009). Данная программа, по мнению авторов, может быть использована как для оценки сейсмической опасности в текущем режиме времени, так и для пространственного картирования параметров сейсмического режима.

Вычисление параметра b осуществляется согласно формуле [Aki, 1965]:

$$b = \frac{\lg e}{\overline{M} - (M_c - \Delta M / 2)} \quad (1.4)$$

где $\lg e$ – постоянная величина, M_c – минимальная представительная магнитуда и $\overline{M}$ – средняя магнитуда землетрясений, полученная по данным выборки землетрясений при $M \geq M_c$, ΔM – интервал дискретизации (binned) магнитуды (Папандопуло, 2016). Важным условием для вычисления данного параметра является предварительное определение

величины M_c , которая находится в каталогах землетрясений. Разными исследователями эта величина оценивается по-разному. Однако, самым простым и надежным методом для оценки полноты каталогов является закон распределения Гутенберга- Рихтера.

На Сахалине количественная оценка параметра b -value выполнена в работе [The Neftegorsk..., 1997] для афтершоков Невельского землетрясения. Авторы подготовили каталог из 3300 афтершоковых землетрясений. Для количественной оценки коэффициента b был использован алгоритм расчета, реализованный в компьютерной программе ZWAR [Wiemer, 1997], а затем построен график повторяемости землетрясений в зависимости от магнитуды. На основе графика им сделан вывод, что представительность зарегистрированных афтершоков обеспечивается лишь начиная с $M_{min} \geq 2.1$. Значения b в разных частях афтершокового облака равнялись от 0.7 до 1.5.

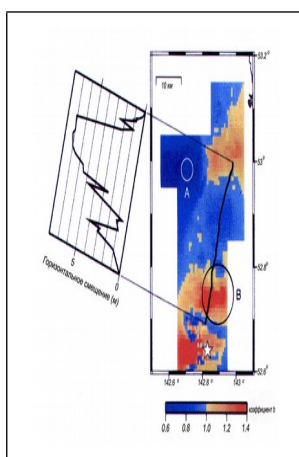


Рисунок 1.7 - Карта распределения значения b в афтершоковой зоне Невельского землетрясения 1995 г. и горизонтальное смещение поверхности разрыва, по [Surface faults..., 1996]. Звездочкой обозначен эпицентр основного толчка, полученного по анализу волновой формы

Динамика сейсмического режима Невельского события отслеживается в исследовании автора с помощью графика повторяемости и графика спадания количества афтершоков во времени. Диапазон магнитуд представительных землетрясений составляет 2.0-6.2. Наклон графика повторяемости афтершоков Невельского события составил 0.72, что меньше по сравнению с рассчитанным [Оскорбин, 1997] для юго-западной шельфовой сейсмогенной зоны о. Сахалин. Значение b по отдельным суткам варьирует в диапазоне от 0.72 до 0.75. Отмечается также изменение наклона графика повторяемости на момент зарождения сильного афтершока с $M > 4.0$ [Невельское землетрясение..., 2009].

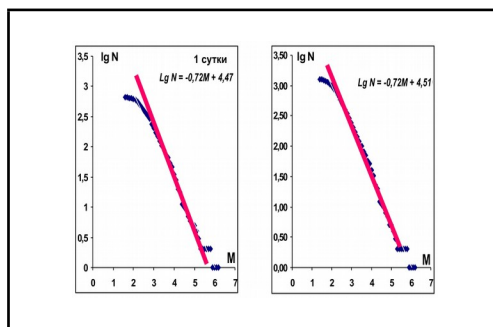


Рисунок 1.8 - Графики повторяемости афтершоков Невельского землетрясения 2007 г.

На фоне практически не развивающихся сетей из пунктов мониторинга ряда потенциально интересных геофизических параметров (ЭМ поле, радон, уровень грунтовых вод, ГАЭ и др.) изучение последовательностей землетрясений остается единственным инструментом исследования сейсмического режима. Ряд успешных работ по исследованию сейсмического режима на Сахалине связывают с хорошими регистрационными возможностями сейсмологической сети СФ ФИЦ ЕГС РАН. Такие работы [Тихонов, 2009; Закупин, 2016; Тихонов, 2016] были проведены в ИМГиГ ДВО РАН в последние 5-10 лет на основе алгоритмов LURR [Yin, 1995; Development..., 2001; Feng et al., 2012] и СРП [Малышев, 1991]. Эти методики, основанные на анализе сейсмических каталогов, позволяют определить основные точки перехода сейсмического режима в состояние близкое по готовности к диссипации значительной части накопленной упругой энергии, причем по времени оценки достижения пика (для разрядки) сопоставимы со среднесрочными оценками и порой составляют несколько месяцев. Отметим, что два прогноза были сделаны не в ретроспективе и были зарегистрированы в СФ РЭС. Это прогнозы Онорского 14.08.2016 ($M_w=5.8$) и Крильонского 23.04.2017 ($M_w=5.0$) землетрясений, сделанные за несколько месяцев до даты событий по методу LURR. В работе [Tikhonov, 2012] метод СРП применялся для ретроспективного прогноза двух сильных сейсмических событий: 4 октября 1994 г. Шикотанского и 2 августа 2007 г. Невельского землетрясений, совместно с другими методами. Результаты данной работы получены с помощью программного комплекса «Seis-ASZ», который был разработан в ИМГиГ ДВО РАН для выполнения расчетов по методу LURR [Закупин, 2016]. Для работы с алгоритмом СРП применялся программный комплекс «SeisDynamicsView», который был предоставлен авторам А.И. Малышевым (ИГГ УрО РАН).

Выводы по главе 1

В первой главе кратко описаны самые разрушительные землетрясения за последние сто лет, последствия которых показали, что исследования сейсмичности на территории Дальнего Востока России для обеспечения безопасной жизнедеятельности, а также для фундаментальной науки в целом наиболее актуальны и эффективны. В главе показаны наиболее общие представления о протекании сейсмического процесса, основных режимах накопления и диссипации тектонических напряжений, базовых моделях механики сплошной среды, на которые эти представления опираются. Представлены основополагающие материалы о режимах сейсмического процесса и рассмотрены известные модели сейсмического очага, как основы для применения методов, определяющих переходные процессы на различных стадиях деформирования. Приведен обзор по выявлению признаков подготовки сильных землетрясений на заключительных этапах в режимах развития сейсмического процесса и аномальном поведении в этот период различных геофизических полей. Обзор известных методов прогноза сейсмической опасности показал, что, несмотря на широкий спектр имеющихся работ на территории Дальнего Востока, общая эффективность не является достаточной. Также показано, что среди исследований в области прогноза сейсмической опасности многообещающие работы проводятся сейсмологами ИМГиГ ДВО РАН, в основе которых лежит выбор методов прогноза для исследования сейсмического режима. Вследствие чего можно сделать вывод об исключительной важности проводимых исследований по выявлению в сейсмическом режиме Сахалина характерных точек перехода (смен состояний) на заключительном этапе разрушения в очаговой области (на основе анализа сейсмических каталогов).

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ МЕТОДАМИ LURR (LOAD-UNLOAD RESPONSE RATIO) И СРП (САМОРАЗВИВАЮЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ)

2.1 История развития инструментальных сейсмологических наблюдений на Сахалине и современные возможности сейсмической сети СФ ФИЦ ЕГС РАН

Инструментальные сейсмологические наблюдения проводились на о. Сахалин с начала XX века, когда после Русско-Японской войны 1904-1905 гг. южная половина острова стала частью Японии. С 1909 по 1934 гг. при метеорологических обсерваториях Японского метеорологического агентства в населенных пунктах Одомари (ныне г. Корсаков), Поронайск, Долинск, Углегорск были открыты сейсмические станции. Практически все они были разрушены во время военных действий 1945 года, тогда же были утрачены архивы сейсмограмм за 1909-1945 гг.

Развитие региональной сети сейсмических наблюдений началось с открытия 25 октября 1947 г. сейсмической станции в г. Южно-Сахалинск.

После катастрофического Камчатского землетрясения и цунами 4 (5) ноября 1952 года была создана Служба предупреждения о цунами (СПЦ), в которой главную роль играла сейсмическая часть. Сейсмическая станция Южно-Сахалинск отвечала за оперативное оповещение местных органов власти обо всех ощутимых и сильных землетрясениях в Дальневосточном регионе и оценку возможности возникновения волн цунами. С этого времени началось активное развитие региональной сети сейсмических наблюдений, сначала в рамках Сахалинского комплексного научно-исследовательского института (ныне Институт морской геологии и геофизики), затем Сахалинской опытно-методической сейсмологической партии (СОМСП), преобразованной впоследствии в Сахалинский филиал Геофизической службы РАН (СФ ГС РАН), а ныне переименованный в СФ ФИЦ ЕГС РАН (Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН) [Чебров, 2007].

На 31 декабря 2019 г. сеть станций сейсмологических наблюдений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН состояла из 44 пунктов инструментальных непрерывных наблюдений, из них 34 стационарных и 10 автономных полевых (локальная сеть на юге Сахалина). Все пункты оборудованы цифровым оборудованием. Общее число сейсмометров установленных на стационарных наблюдательных пунктах на 31 декабря 2019 года — 61. Из них: 25 акселерометров, 23 широкополосных и 13 короткопериодных велосиметров (рисунки 2.1 и 2.2).

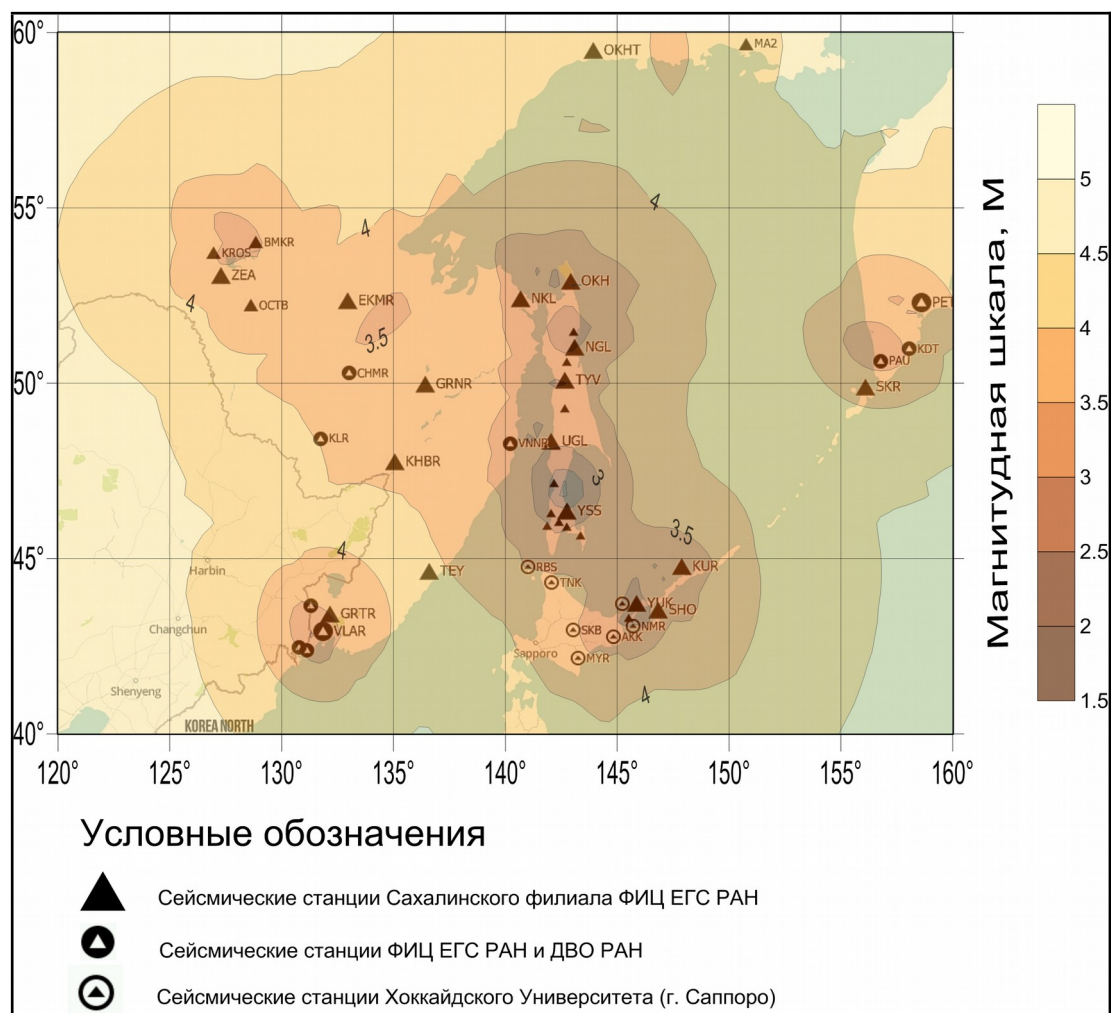


Рисунок 2.1 - Сеть станций сейсмологических наблюдений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН

На Сахалине расположено 16 стационарных наблюдательных пунктов, из них 12 автоматических (в том числе 8 выносных пунктов опорной станции «Южно-Сахалинск»). Кроме того, на юге Сахалина расположена локальная сеть из 10 автономных полевых станций.

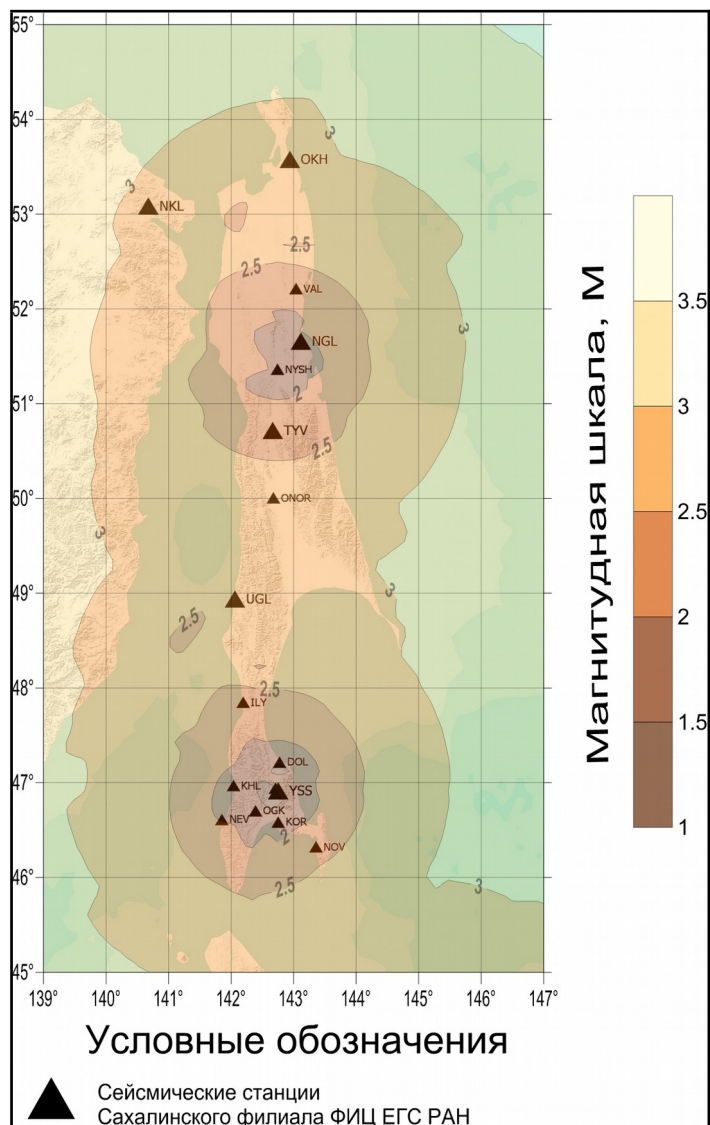


Рисунок 2.2 - Сеть станций сейсмологических наблюдений на Сахалине

Исходными данными для работы с алгоритмами являются каталоги, составленные по данным локальной сети автоматизированных цифровых сейсмических станций Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук с $M \geq 1.5$ для юга Сахалина за период с 2004 по 2018 гг. и каталоги землетрясений за период с 2005 по 2016 гг. по данным станций сети СФ ФИЦ ЕГС РАН с $M \geq 2.8$ для севера Сахалина. Данные за период с 1988 по 2005 гг. содержит региональный каталог землетрясений с $M \geq 3.0$, составленный (Региональный каталог..., 2006).

В качестве инструмента для выделения афтершоковых последовательностей сейсмических событий в каталоге землетрясений за период с января по июль 2007 г., использовалась программа, разработанная В.Б. Смирновым в Московском

Государственном Университете им. М.В. Ломоносова [Смирнов, 1997]. В алгоритм программы заложен метод локального отношения интенсивностей (ЛОИ), авторами которого являются Г.М. Молчан и О.Е. Дмитриева [Молчан, 1993].

2.2 Основы метода LURR и средства для проведения расчетов

2.2.1 Оригинальные алгоритмы и выбор параметров для анализа сейсмичности на о. Сахалин

Название метода можно перевести с английского как «отношение отклика среды на нагрузку/разгрузку». Метод опирается на непротиворечивые модели теории упругости (модель абсолютно жесткой Земли) и механики разрушения (критерий Кулона–Мора). Основной посыл состоит в том, что за пределами упругого деформирования среды реакция на нагрузку не соответствует реакции на разгрузку. Со временем это несоответствие только усиливается – вплоть до потери устойчивости разрушающегося объекта.

С микроскопической точки зрения процесс разрушения геоматериалов (пород) имеет невероятно сложную структуру [Meakin, 1991; Evolution Induced..., 1994; Krajcinovic, 1996]. В любой породе должно быть большое количество неупорядоченных дефектов (трещины) с разным размером, формой и ориентацией. Процесс повреждения включает в себя зарождение, рост, взаимодействие, объединение и каскад трещин. Это необратимый, неравновесный и нелинейный процесс, который интенсивно изучается в течение десятилетий, но многие фундаментальные вопросы остаются нерешенными.

Проблема повреждения и разрушения твердых тел имеет важное научное и технологическое значение. Для общности на рисунке 2.3 ордината обозначает общую нагрузку P вместо напряжения σ , а абсцисса - откликом R на P вместо деформации ϵ . Если нагрузка, действующая на материал, увеличивается монотонно, материал будет испытывать режимы упругости, повреждения и разрушения или дестабилизации. Самой важной характеристикой упругого режима является его обратимость; т. е. положительный процесс и обратный процесс обратимости. Другими словами, модуль нагрузки и разгрузки одного равен другому. В отличие от упругого режима, режим при котором разрушение необратимо, подразумевает отличие отклика нагрузки от отклика на разгрузку. Это различие указывает на ухудшение качества материалов из-за повреждения.

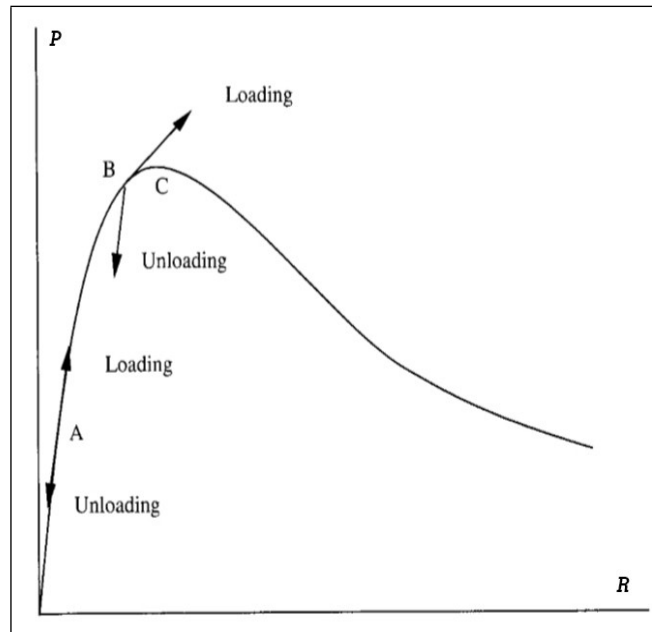


Рисунок 2.3 - Условная кривая фокальной зоны

Чтобы количественно измерить разницу, два параметра определяются следующим образом. Первый - это скорость отклика X , определяемая как

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (2.1)$$

где ΔP и ΔR обозначают приращения нагрузки P и реакции R соответственно. Второй - коэффициент отклика нагрузки / разгрузки (LURR) Y :

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (2.2)$$

где X_+ и X_- относятся к частоте отклика в условиях нагрузки и разгрузки, соответственно.

Ясно, что $Y=1$ для упругого режима, так как $X_+=X_-$ и $Y>1$ для режима повреждения из-за $X_+>X_-$. Чем серьезнее поврежден материал, тем больше значение Y станет. По мере того, как среда разрушается, значение Y становится все больше и больше, чтобы значение Y (LURR) могло измерять близость к разрушению, а также выступает в качестве предвестника предсказания землетрясений.

В механике сплошных повреждений степень повреждения материала зависит от параметра повреждения - D . Существует множество способов определения D - от скалярного до высокого порядка тензора [Krajcinovic, 1996]. Прямым способом является определение D как относительное изменение тензора эффективной жесткости. Однако для

простого условия, оно может быть упрощено. Согласно определению Лемайтра [Lamaitre,1987],

$$D=E_0-E/E_0, \quad (2.3)$$

где модуль E_0 обозначает модуль Юнга для исходного материала, а E означает модуль Юнга в поврежденном состоянии. Легко получить соотношение между D и Y в некоторых простейших условиях (например, одноосевое растяжение или сжатие).

Если мы возьмем напряжение как P и растяжение как R в (2.1) и (2.2), то

$$Y=E/E_+. \quad (2.4)$$

Предполагая, что модуль разгрузки равен E_0 , а модуль нагрузки E_0 - это E , тогда

$$Y = E_0 / E.$$

Поэтому мы можем получить очень простое соотношение между Y и D как:

$$D=1-1/Y. \quad (2.5)$$

Если мы примем другие более сложные определения повреждения, соотношение между Y и D уже не будет таким простым, как (2.5), хотя по-прежнему существует функциональное соотношение между Y и D . Иными словами, Y фактически является другой переменной повреждения.

Известно, что трещине или объемному сейсмическому разлому соответствует землетрясение с заданной величиной и энергией [Kanamori, 1975]. Поэтому было бы лучше определить значение Y непосредственно из сейсмической энергии следующим образом:

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N^+} E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N^-} E_i^m \right)_-} \quad (2.6)$$

где E обозначает сейсмическую энергию, которая может быть рассчитана согласно Gutenberg-Richter [Kanamori, 1975], знак «+» означает нагрузку, а «-» означает разгрузку, $m=0$ или $1/3$ или $1/2$ или $2/3$ или 1 . Когда $m=1$, E^m - именно сама энергия; $m=1/2$, E^m обозначает деформацию Беньофа; $m=1/3$, $2/3$, E^m представляет линейный масштаб и масштаб области фокальной зоны, соответственно; $m=0$, Y равно N^+ / N^- , а N^+ и N^- - число землетрясений, которое произошло во время нагрузки и разгрузки, соответственно.

Чтобы предсказать землетрясения с точки зрения параметра Y (LURR), решение следует найти для нагрузки и разгрузки блоков земной коры на расстоянии сотни километров и выбрать правильный параметр как R (отклик) для вычисления Y .

Критерий для оценки нагрузки и разгрузки выбирается тривиально. При этом учитываются смещения от приливного воздействия в заданной точке. Использование в методе лунно-солнечных приливов оправдано тем, что другого такого идеального откалиброванного индикатора нагрузки/разгрузки в геосреде найти невозможно. Используется критерий разрушения Кулона-Мора, который в литературе обозначается CFS [Harris, 1998; Reasenber, 1992]:

$$CFS = \tau_n + f\sigma_n, \quad (2.7)$$

где f , τ_n и σ_n означают внутренний коэффициент трения, напряжение сдвига и нормальное напряжение (положительное напряжение) соответственно, $\mathbf{n}$ - нормаль плоскости разлома, на которой CFS достигает своего максимума. Эта плоскость параллельна второму главному напряжению (среднее основное напряжение) σ_2 и угол θ между плоскостью разлома и минимальное основное напряжение (максимальное сжимающее напряжение) σ_3 удовлетворяет следующей связи:

$$\tan 2\theta = 1/f. \quad (2.8)$$

Если приращение кулоновского разрушения $\Delta CFS > 0$, это называется нагрузкой; в противном случае $\Delta CFS < 0$ называется разгрузкой.

Хорошо известно, что результирующее напряжение δ_{ij} в коре состоит из тектонического напряжения δ_{ij}^T и индуцированное приливом напряжение δ_{ij}^t . Поскольку уровень δ_{ij}^T (порядка 10^6 - 10^8 Pa) значительно выше уровня δ_{ij}^t (10^3 - 10^4 Pa), то направления основного напряжения, результирующего напряжения в коре, а затем направление $\mathbf{n}$ может быть определяемым только тектоническим напряжением. Тем не менее, скорость изменения приливных индуцированных напряжений намного больше, чем скорость тектонического напряжения [Absence of earthquake..., 1998], таким образом, ΔCFS в основном обусловлен индуцированным приливом напряжением, которое можно было бы точно рассчитать. Сдвиг и нормальное напряжение на плоскости разлома с нормальным $\mathbf{n}$ можно получить путем преобразования тензора напряжений, после чего ΔCFS можно легко вычислить по (2.7).

Таким образом, так как метод предполагает определение компонент тензора напряжений на площадке, где расположен слип-вектор, то для его определения необходимо производить расчет фокального механизма. Расчеты выполняются для

каждого землетрясения в каталоге. Исследуемый параметр (LURR) отождествляется с отношением суммарной деформации Бенъоффа всех положительных землетрясений ко всем отрицательным за некоторый промежуток времени (в математической обработке это величина скользящего окна). В упругопластических средах перед разрушением наблюдается явление текучести, когда при неизменных напряжениях деформация продолжает расти. Очевидно, что при таком положении вещей расчет отношения отклика на нагрузку к отклику на разгрузку не имеет смысла (реакции как таковой нет), а математически параметр LURR снова становится близким к единице. В области перехода от упругого к неупругому деформированию этот параметр начнет расти и вблизи разрушения среды достигнет своих максимальных значений. Именно поэтому в среде, где реализуется хрупкое разрушение, можно ожидать главное (прогнозируемое) событие после выхода кривой на максимальные значения, а в среде, где возможно проявление пластических эффектов, возникает возврат параметра к фоновому уровню и некоторая задержка (временной лаг с момента определения прогнозного признака, вариации LURR) по времени. Очевидно, что эта задержка зависит от геологических условий. Метод LURR очень подробно излагается в оригинальных работах [Yin, 1991; Yin, 1993; Yin et al., 1994; Yin, 1995].

В дальнейшем мы обсудим теоретические основы метода в комплексе с подходами метода СРП для определения опорных точек для их совместного применения. Сейчас предлагается рассмотреть вопросы подготовки данных и выбора параметров для расчетов по методике LURR.

Важными компонентом, который определяют итоговый результат, является выборка сейсмических событий. В методике LURR для прогноза землетрясения авторы [Yin, 1995] используют сепарацию сигналов, основанную на выделении полосы магнитуд для расчета. Основа для выбора диапазона это величина разрыва в очаге. Ретроспективно это работает, на практике для оперативного прогноза можно использовать карты районирования и графики повторяемости для оценки величины возможного события. Практически, сохраняя оригинальные значения для прогноза землетрясений с магнитудой выше 5.5, в расчет принимались события с магнитудами от 3.3 до 5.0. По такому же принципу выбирается и область для расчета, по которой из каталога делается выборка. Таким образом, учитываются только события определенной магнитуды и эпицентрального расположения. Например, для магнитуд порядка 6 и выше, область расчета не должна быть меньше 2 градусов по широте и долготе. Считаем это обоснованным, так как исследования по сейсмическому районированию и прогнозу

землетрясений показали, что пространственно-временные и сейсмогеодинамические признаки подготовки крупных сейсмических событий следует рассматривать как систему, охватывающую разномасштабные иерархические уровни сейсмической активизации - глобальный, региональный, локальный и очаговый [Опыт картирования..., 1993]. Чем крупнее сейсмические очаги и, соответственно, чем выше магнитуда генерируемых ими землетрясений, тем крупнее и объемы геологической среды, ответственные за их подготовку. Поэтому при изучении очаговой сейсмичности, сейсмического режима, при оценке сейсмической опасности той или иной территории всегда необходимо исходить из соответствующих размеров конкретных и генетически взаимосвязанных сейсмогенерирующих геологических структур сейсмоактивных регионов. Для наиболее крупных сейсмических очагов протяженность таких геоструктур может достигать нескольких тысяч, а ширина - нескольких сот километров [Опыт картирования..., 1993]. Для нашей работы мы полагаем, что размер рабочей области, в пределах которой может быть расположен очаг землетрясения конкретной магнитуды, должен превышать, как минимум, в четыре раза размеры такого очага.

Для определения положения фокальной плоскости с помощью программы FOCMEC, интегрированной в комплекс сейсмологических программ SEISAN [Ottemöller et al., 2011] определяются механизмы землетрясений. Не для всех землетрясений в выбранном диапазоне магнитуд (от 3.3 до 5.0) можно получить решения. Часть решений удавалось получить, в противном случае проблему решали, подбирая решения исходя из карты ВОЗ и механизмов очагов сильных землетрясений для основных линеаментов и доменов. Например, для Онорского землетрясения в расчетную зону попали 517 землетрясений с 2006 по январь 2016 года. При этом в рабочий диапазон магнитуд 3.3-5.0 попадает 48 событий, среди которых механизмы с высокой точностью рассчитаны для 20 (по данным не менее 12 станций), остальные рассчитаны с меньшей точностью, около 10 подобраны. Улучшить здесь ситуацию можно лишь уплотнением сети сейсмических станций.

Выбор размера скользящего окна в размере одного года определяется опытом предшественников [Yin, 1995], которые отдавали предпочтение именно этому значению, а также частоты событий с магнитудой от 3.3 до 5.0, которая в среднем достигала за этот период от десятка до двух в течение одного года. Такая частота обеспечивает хорошее усреднение и нивелирование ложных выбросов от случайных событий. Для примера на рисунке 2.4 показаны две карты с землетрясениями, на одной из которых произведена выборка для расчета методом LURR.

Для последовательного уточнения положения места прогнозируемого очага эллипсовидные области размером в один градус для каждой полуоси перемещаются по карте (пример на рисунке 2.4).

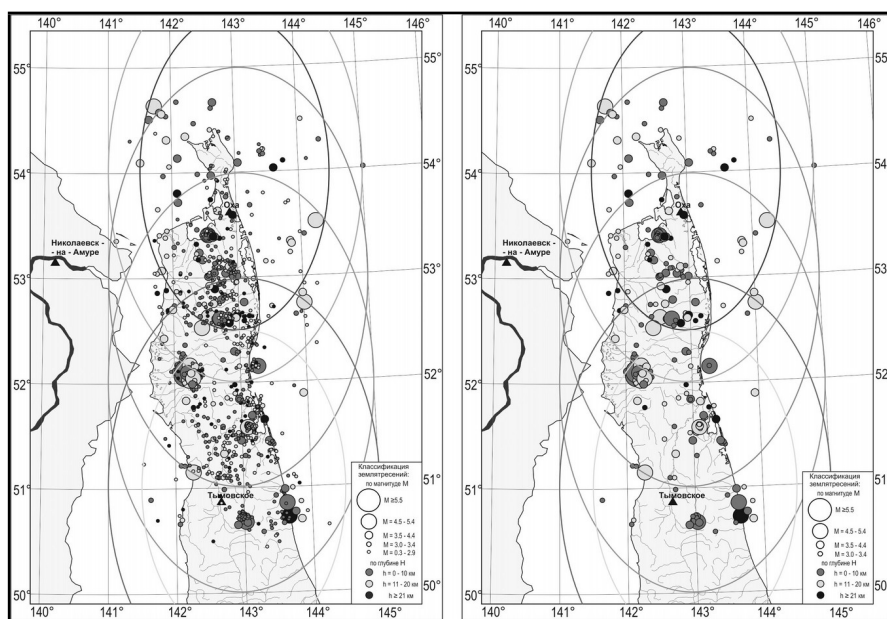


Рисунок 2.4 - Карта сейсмических событий Северного Сахалина с 2006 по 2016 гг. полная (все землетрясения) – слева, в диапазоне магнитуд от 3.3 до 5.0 – справа

По максимальным значениям параметра LURR определяется более точные координаты. Иного пути нет, так как уменьшая область расчета мы опять же как и в случае с временным окном уменьшаем количество событий в выборке.

2.2.2 Программный комплекс «Seis-ASZ» для анализа сейсмических последовательностей методом LURR (структура, назначение, опции)

Входными данными в комплексе являются стандартный тип сейсмологических данных – каталог сейсмических событий, который содержит следующие характеристики по каждому сейсмическому событию: время, место и энергия события.

Выходными данными в качестве результата анализа вариаций LURR в потоке сейсмических событий выступают 3 типа данных: таблицы, графики и текстовые файлы. Для каждого типа выходных данных предусмотрена возможность сохранения в файл стандартного формата для дальнейшего использования. Модульная структура «Seis-ASZ» показана на рисунке 2.5 [А. с. № 2016611230..., 2016].

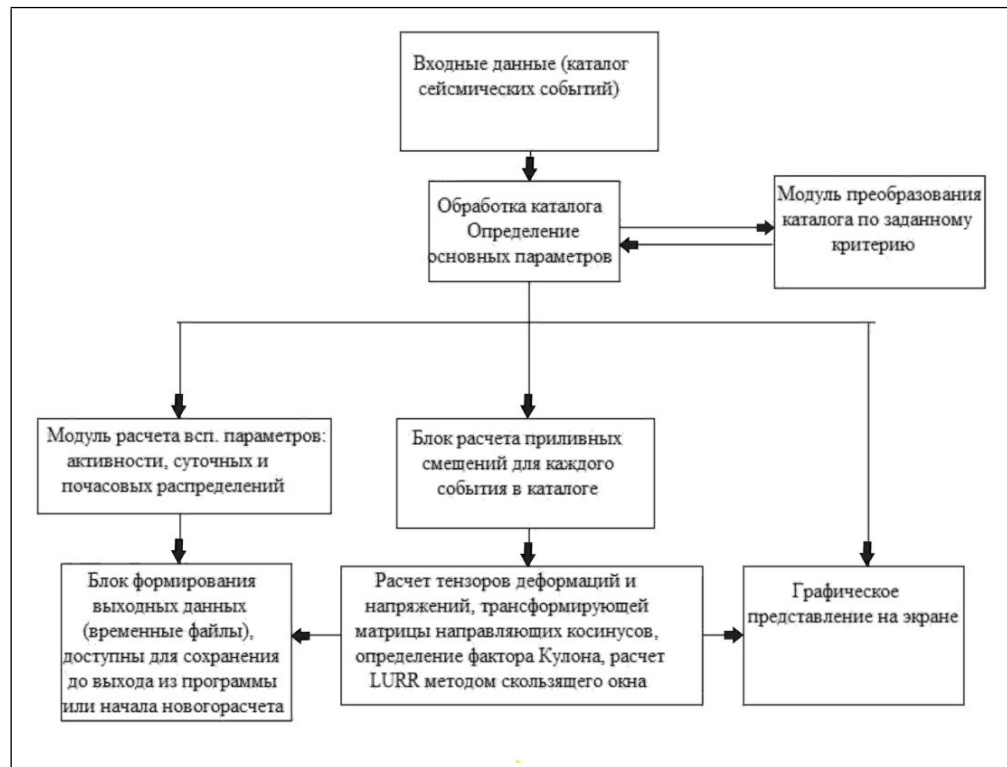


Рисунок 2.5 - Модульная структура комплекса «Seis-ASZ»

Все типы выходных данных могут быть получены при обработке и визуализации исследуемых потоков. До анализа данных исследователь может просмотреть непосредственно сам каталог, получить общую статистику по нему, а также воспользоваться инструментами для получения модифицированных каталогов. Модификации представляют собой результаты сепарации событий по одному из ключевых признаков: пространственному (эпицентр и гипоцентр), временному (время события) и энергетическому (магнитуда). Сам анализ представлен отдельными модулями, которые можно использовать в любой последовательности. Результаты вычислений визуализируются, а также записываются в текстовом формате во временные файлы.

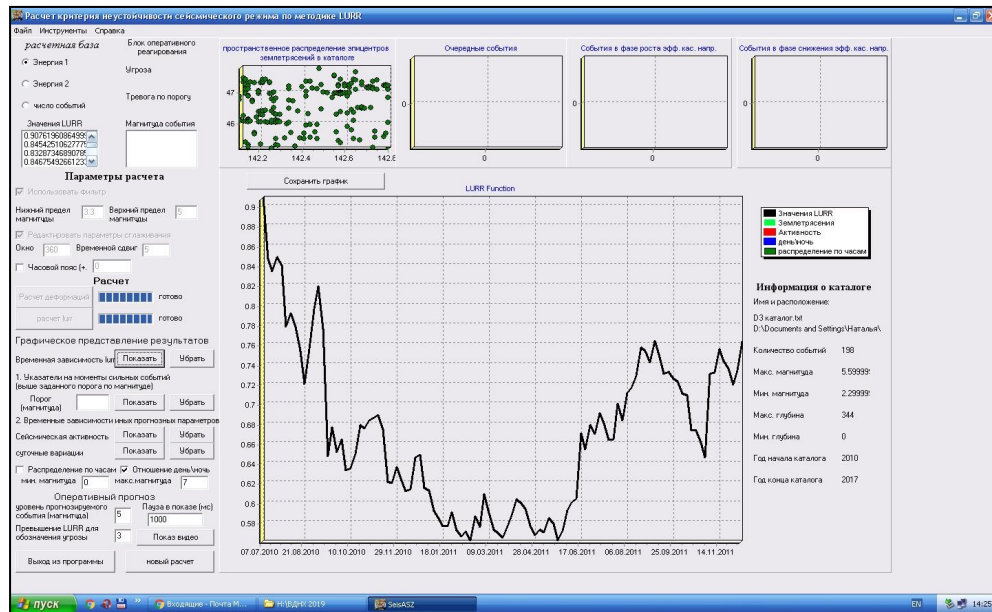


Рисунок 2.6 - Скриншот «Seis-ASZ». Интерфейс программы

Программа позволяет:

1. Считывать данные из каталогов сейсмических событий.
2. Формировать из загруженного каталога новые каталоги методом сепарации по одному из ключевых признаков.
3. Выполнять следующие функции:
 1. Получение общей информации по каталогу (краевые значения по характеристикам каталога: время, место и энергия).
 2. Производить селективный отбор событий по ключевым параметрам и формировать модернизированные каталоги.
 3. Проводить расчет гравитационного потенциала и формируемые им приливные деформации в заданной точке планеты в любой момент времени
 4. Проводить расчета компонент тензора напряжений в системе n-s, e-w, z по полученным смещениям и деформациям. Получить компоненты тензора в осях, которые согласованы с нодальной плоскостью очага так, что касательные напряжения лежат в плоскости слип-вектора.
 5. Проводить расчет параметра LURR.
 6. Графически отображать полученные результаты и формировать текстовые файлы с выходными данными.
 7. Проводить построение параметра LURR в активном режиме (выводить графики не сразу, а по отдельным точкам с паузами). В данном режиме производить

отображение сейсмических событий «разного знака» в отдельных окнах и подавать сигналы о превышение некоторого заданного порога параметра и появление в потоке событий заданной магнитуды.

8. Производить расчет сейсмической активности, суточных распределений сейсмических событий, почасовых распределений.

Интерфейс «Seis-ASZ» показан на рисунке 2.6.

2.3 Основы метода СРП и средства для проведения расчетов

Сейсмический цикл делится на три стадии: афтершоки после главного толчка, стабильный режим и форшоки перед новым толчком. Есть мнение, что катастрофические землетрясения могут возникнуть между очагами уже произошедших землетрясений. Это может произойти в период порядка 100 лет, а землетрясения должны быть сопоставимы по энергии [Федотов, 1968].

Сейсмический процесс как таковой можно разграничить на главные толчки, форшоки и афтершоки, роевую и фоновую сейсмичность. Также сейсмический процесс можно разделить на стадии активизации, затухания и стационарного развития. В качестве уровня активности сейсмического процесса взят некий параметр x , который характеризует развитие сейсмического процесса во времени и его первая производная во времени dx/dt . Таким образом, последовательности активизации, это такие последовательности, для которых вторая производная будет положительной $d^2x/d^2t > 0$. Математическим эквивалентом процесса затухания будет неравенство $d^2x/d^2t < 0$, а эквивалентом стационарного развития будет являться соотношение $d^2x/d^2t \approx 0$ [Малышев, 2007].

Но использовать данный критерий невозможно из-за разницы интервалов в продолжительности времени непосредственно землетрясения, которая слишком мала по сравнению с временными промежутками между землетрясениями. При этом, изменение любого параметра, который характеризует развитие сейсмического процесса, при равномерной временной шкале будет дискретно во времени.

Процессы, при протекании которых изменение уровня активности зависит от текущего состояния, можно выполнить зависимость $d^2x/d^2t = F(dx/dt)$. В дальнейшем Малышев модифицировал свое уравнение и привел его к такому виду:

$$d^2x/d^2t = k|(dx/dt)^\lambda - (dx/dt)_0^\lambda|^{\alpha/\lambda}, \quad (2.9)$$

где параметр x – любая неубывающая количественная характеристика, естественным образом отражающая развитие процесса; k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность развития процесса, соответственно. Для исследования динамики отклонений процесса от стационарного состояния в значительных пределах уравнение СРП принимает такой вид:

$$d^2x/d^2t = k|(dx/dt)|^\alpha. \quad (2.10)$$

Решения уравнения (2.10) представляют собой либо линейную зависимость, либо сводятся к линейным зависимостям при логарифмировании (Малышев, 1991).

В качестве параметра x может использоваться кумулятивная сумма числа сейсмических событий N , либо такая же сумма энергии E , либо сумма для условной высвобожденной деформации D .

В нашей работе используется новая версия методики моделирования, которая обладает повышенной устойчивостью получаемых результатов. В качестве критерия выбора аппроксимационной зависимости используется коэффициент упорядоченности K_{yn} , который рассчитывается по формуле:

$$K_{yn} = \left[n \times (x_n - x_1) \times (t_n - t_1) / \sum (\Delta x_i \times \Delta t_i) \right]^{0,5}, \quad (2.11)$$

где n – это число точек на аппроксимируемом участке фактических данных, $(x_n - x_1)$ и $(t_n - t_1)$ являются диапазонами изменения фактических данных на данном участке по параметру x и времени t , Δx_i и Δt_i – отклонения каждой точки фактических данных от расчетов кривой по оси абсцисс и по оси ординат [Малышев, 2017].

В процессе оптимизационного поиска расчет коэффициента упорядоченности осуществляется путем пересчета фактических данных в координаты, параметры A и B этой зависимости определяются стандартной линейной аппроксимацией. После этого, с учетом заданного сочетания значений асимптот определяются параметры уравнения (2.10) и начальные условия для его частного решения. Это позволяет получить расчетную зависимость данного решения. Далее эта зависимость используется, чтобы получить уже в реальных координатах расчетные значения по параметру и времени и используемых при расчете K_{yn} отклонений Δx_i и Δt_i .

Основным шагом настройки алгоритма является оценка оптимального радиуса R , который определяет сейсмоактивный объем, из которого делается выборка сейсмических событий. Важно отметить, что если выборка содержит менее 20 событий, то результаты настройки будут нестабильными. Малышев выявил, что для того, чтобы точность

параметра T_0 была наиболее высокой, не нужно варьировать положение центра круговой области и подстраиваться под вероятное положение землетрясения [Малышев, 2017].

Для получения устойчивых решений по результатам моделирования важно, чтобы используемые каталоги были достаточно детальны. При недостаточной детальности может происходить сдвиг обрабатываемой выборки и резкое изменение параметров модели, что приведет к неустойчивости положения вертикальной асимптоты аппроксимационной зависимости $N=f(t)$.

Аппроксимируемый участок фактических данных анализируется для всех вариантов сочетания асимптот по времени и параметру. Оптимизация для каждого варианта выполняется независимо и далее можно выбрать вариант с наибольшим значением коэффициента упорядоченности. Значения параметра *alfa* характеризуют степень нелинейности хода сейсмического процесса при его отклонениях от стационарного состояния. В свою очередь, точность определения параметра T_a зависит от правильности оценки параметра *alfa*.

2.3.1 Программный комплекс «SeisDynamicsView» для анализа сейсмических последовательностей методом СРП (структура, назначение, опции)

Входными данными в комплексе является каталог сейсмических событий, который содержит следующие характеристики по каждому сейсмическому событию: дата, координаты и энергия события.

Выходными данными в качестве результата анализа в потоке сейсмических событий выступают 2 типа данных: графики и текстовые файлы. Для каждого типа выходных данных предусмотрена возможность сохранения в файл стандартного формата для дальнейшего использования.

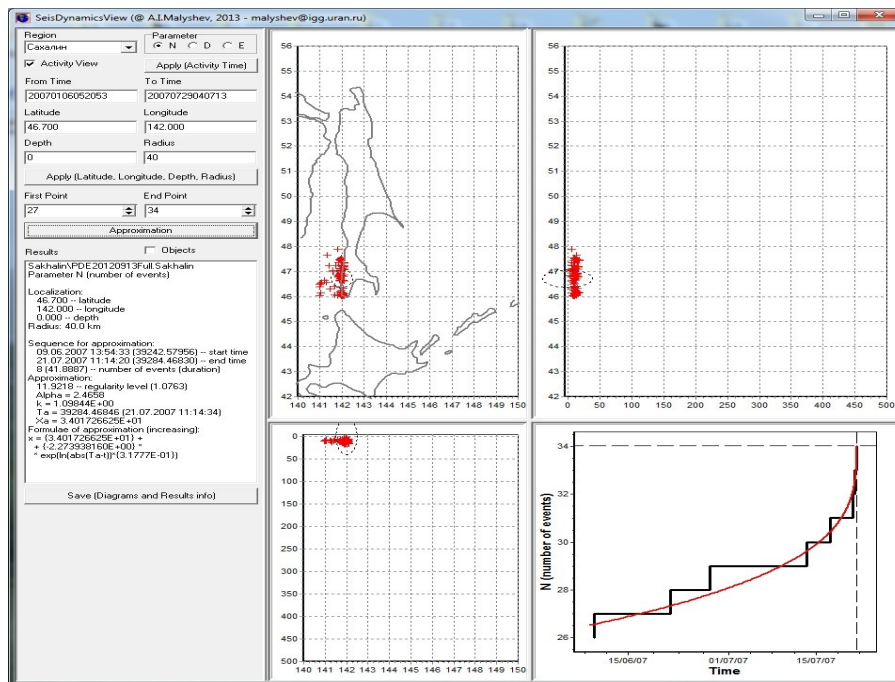


Рисунок 2.7 - Скриншот «SeisDynamicsView». Интерфейс программы

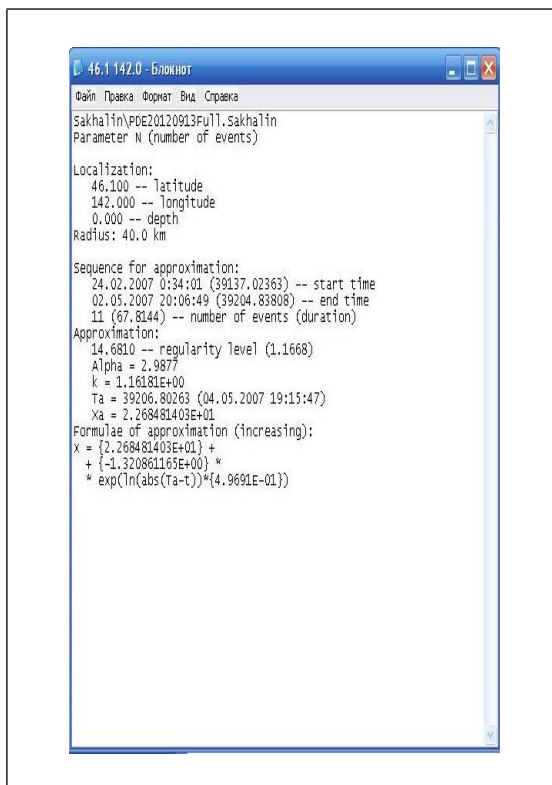


Рисунок 2.8 - Скриншот «SeisDynamicsView».

Результаты расчета исследуемых параметров сохраняются в текстовом файле
 Программа позволяет:

1. Считывать данные из каталогов сейсмических событий.
2. Формировать из загруженного каталога последовательности затухания и активизации сейсмической активности.
3. Выполнять следующие функции:
 1. Получение общей информации по каталогу (краевые значения по характеристикам каталога: даты событий по заданным координатам и радиусу).
 2. Производить выборку событий по установленным координатам в пределах предварительно выбранного радиуса и формировать ступенчатые кривые изменения параметра N (количество землетрясений) в выбранной области.
 3. Посредством аппроксимации кривых получать значение параметра T_a – времени в очаге прогнозируемого события (рисунок 2.7).
 4. Проводить расчет параметра $alfa$ – показателя степени нелинейности развития сейсмического процесса и коэффициента упорядоченности k параметра $alfa$.
 5. Графически отображать полученные результаты и формировать текстовые файлы с выходными данными (рисунок 2.8).

2.4 Физические основы для многостадийного подхода при изучении сейсмического режима методами LURR и СРП

Метод LURR был разработан китайскими сейсмологами в 90-х годах [Yin, 1991; Yin, 1993]. При обосновании метода предполагалось, что прогнозным признаком приближения к разрушению сплошной среды в области очага землетрясения является увеличение некоторого параметра, характеризующего различие между нагрузочной кривой $\sigma=f(\epsilon)$ от закона Гука. Авторами [Yin, 1991] подразумевается, что нагрузочная кривая для главного напряжения и главной деформации (одной из компонент этих тензорных величин) может описывать поведение материала среды в области, значительно большей размеров готовящегося очага, под воздействием лунно-солнечных приливов.

Независимо от китайских сейсмологов в работах Николаева А.В. рассматривались также взаимосвязи землетрясений и фаз приливных возмущений [Николаев, 1994а; 1994б]. И китайские, и российские работы, в которых несколько отличается методика статистического анализа, дали сходный результат. В методе LURR внимание обращено на различие деформационных откликов среды на разных фазах прилива. Необходимым условием для появления такого различия является нелинейность зависимости $\sigma(\epsilon)$, появление которой связывалась с процессом накопления повреждений

$$\sigma(\varepsilon) = E_0 [1 - D(\varepsilon)] \varepsilon \quad (2.12)$$

где σ - главное действующее напряжение; ε - соответствующая ему компонента деформации, E_0 – модуль упругости; D – мера поврежденности материала, введенная согласно [Lamaitre, 1987]. Параметр D увеличивается с ростом ε от 0 до 1, в некоторых работах, например [Макаров, 2008], зависимость D от времени увязывается с накоплением микротрещин. Неупругость среды определяет различие изменений деформации $\delta\varepsilon_+$, $\delta\varepsilon_-$ (плюс и минус определяют направление градиента приливной волны). При увеличении и уменьшении напряжения на одну и ту же величину $\delta\sigma$ рассматриваются абсолютные величины всех изменений. Количественной характеристикой неупругости деформации на данной стадии процесса может служить отношение деформационных откликов на пригрузку и разгрузку R_ε :

$$R_\varepsilon = \frac{\delta\varepsilon_+ / \delta\sigma}{\delta\varepsilon_- / \delta\sigma} = \frac{\delta\varepsilon_+}{\delta\varepsilon_-} \quad (2.13)$$

Отношение R_ε можно выразить через величины, входящие в (2.12) с помощью следующей формулы (простые выкладки опущены)

$$R_\varepsilon = 1 + \frac{2\sigma}{E_0(1-D)} \frac{dD/d\varepsilon}{d\sigma/d\varepsilon} \quad (2.14)$$

В отсутствие накопления дефектов с ростом деформации (или напряжения) производная $dD/d\varepsilon=0$, и $R_\varepsilon=1$. Выражение (2.14) показывает, что значения R_ε могут заметно отличаться от единицы лишь на участке пластического деформирования, когда наклон касательной к графику деформационной кривой существенно уменьшается, и, кроме того, сама деформация $\varepsilon = \sigma/[E_0(1-D)]$ конечна. В терминах недавней работы [Кочарян, 2018] это условие можно перефразировать как снижение эффективной жесткости вмещающей среды. В точке перехода к запредельному деформированию, где $d\sigma/d\varepsilon=0$ выражение для R_ε теряет корректность, но разрушение в среде (землетрясение) происходит уже на запредельном участке деформирования. Это предопределяет, что деформационный отклик R_ε (признак нарастания пластических деформаций) может быть информативен как среднесрочный (недели – месяцы), но не краткосрочный предвестник сильного землетрясения (часы – дни).

В работах [Yin, 1991; Yin, 1993; Yin et al, 1994] было предложено рассматривать вместо отношения деформационных откликов R_ε параметр LURR: отношение откликов потока сейсмических событий на тестовую пригрузку и разгрузку. В качестве тестовых изменений напряжения были выбраны лунно-солнечные приливы. Параметр LURR, Y_m ,

введен для аддитивных величин: сейсмической энергии, деформации Беньоффа и накопления сейсмических событий при помощи следующего соотношения

$$Y_m = \frac{\sum_{i=1}^{N^+} (E_i^m)_+}{\sum_{i=1}^{N^-} (E_i^m)_-} \quad (2.15)$$

В выражении (2.15) E_i обозначает сейсмическую энергию события с номером i , которая может быть вычислена по энергетическому классу ($E = 10^K$, [Раутиан, 1960]), который в свою очередь связан с магнитудой ($K=1.8 M+4$). Знак «+» означает события, произошедшие в период прироста нагрузки, а знак «-» - события при разгрузке. Показатель степени m принимает значения $m=1, 1/2, 0$. При $m=1$ параметр $Y_1=Y_E$ представляет собой отношение выделенной сейсмической энергии в периоды соответственно прироста и уменьшения напряжения вследствие приливов. При $m=1/2$ этот параметр описывает отношение откликов деформации Беньоффа на тех же фазах прилива, $Y_{1/2}=Y_B$. А при $m=0$ он сводится к отношению количества событий N^+, N^- , произошедших во время нагрузки и разгрузки соответственно. $Y_0=Y_N=N^+/N^-$. Положительными считаются приливные возмущения на той фазе прилива, когда увеличивается напряжение сдвига, действующее вдоль поверхности, по которой в соответствии с законом Кулона – Мора, легче всего происходит проскальзывание [Harris, 1998]. Стоит отметить, что в работах Николаева А.В. [Николаев, 1994а; Николаев, 1994б] при построении отношения числа событий N^+/N^- в периоды прироста нагрузки и разгрузки, эти периоды выбирались несколько иначе: по возмущениям вертикальной компоненты напряжения (добавка к литостатическому давлению соответствует положительной фазе).

Среди неоднократных попыток использования форшоков или их последовательностей в качестве среднесрочных и краткосрочных предвестников времени землетрясения подход, предложенный в работе [Мальшев, 1991], продемонстрировал свою пригодность и эффективность для сейсмоопасного региона Сахалин – Курилы. Этому способствовало его применение для зон ожидаемых землетрясений, предварительно выделенных другими методами, в частности по сейсмической брешу второго рода [Тихонов, 2009; Tikhonov, 2012]. Мальшев А.И. и Тихонов И.Н. разработали следующий алгоритм уточнения времени главного события:

– выделение интервала времени с нарастающей сейсмической активностью (заведомо короче периода повторяемости ожидаемого события, но больше времени, в течение которого наблюдается спонтанная активация: серия (кластер) событий);

- аппроксимация сейсмической последовательности на этом интервале решением дифференциального уравнения «взрывного типа», существующего в течение ограниченного времени, подбор параметров решения (обратная задача);
- оценка предельного времени развития саморазвивающегося процесса, сопоставляемого с моментом прогнозируемого землетрясения, по найденным параметрам аппроксимации.

В общих чертах этот алгоритм сходен с концепцией самоорганизации, в которой описываются режимы с обострением в динамике нелинейных систем при околокритических условиях [Малинецкий, 2002]. Согласно работе [Малышев, 1991] алгоритм получил название метода саморазвивающихся процессов (СРП). Авторская терминология подчеркивает, что реализация алгоритма при ограниченном количестве событий весьма нетривиальна [Малышев, 2018]. Для данной работы важно, что для описания саморазвивающихся процессов использовано кинетическое уравнение первого порядка для переменной $y = dx/dt$, т.е. производной от параметра $x(t)$, сопоставляемого с накоплением числа событий $N(t)$, или выделением сейсмической энергии $E(t)$. Это уравнение имеет форму [Малышев, 1991]:

$$d^2x/dt^2 = A | (dx/dt)^\lambda - a^\lambda |^{\alpha/\lambda}, \text{ или } dy/dt = A | y^\lambda - a^\lambda |^{\alpha/\lambda} \quad (2.16)$$

где A , α , λ , a – неопределенные положительные константы, причем в начальный момент времени $dx/dt > a$. Уравнение (2.16) описывает взрывной рост переменной $y(t)$, более быстрый по сравнению с экспоненциальной зависимостью, но не может описать переход сейсмического режима от фонового (квазистационарного) к активизации. Начальный момент времени, когда для уравнения (2.16) ставятся условия Коши $x(0)=x_0$, $dx(t)/dt=y_0$, определяется по другим признакам завершения предшествующих стадий, что может проявляться в появлении/исчезновении среднесрочных предвестников.

Параметры аномалий LURR и аномалии СРП также находят аналоги в поведении в обобщенной окрестности сильного землетрясения (ОСЗ). Как показано в работе [Родкин, 2008], моменту ОСЗ предшествует сначала (несколько лет) предваряющая аномалия роста средней сейсмической активности (определенной как число событий в скользящем временном окне заданной длительности). Затем, примерно за 100 дней до события, начинает развиваться лавинообразная аномалия, нарастающая к моменту события (СРП).

Выводы к главе 2

Во второй главе приведены характеристики сейсмических данных, которые использовались для расчетов, описаны возможности сети сейсмических станций СФ ФИЦ

ЕГС РАН. Представлены интерфейсы программных комплексов LURR и СРП. Описаны методы моделирования сейсмического режима и программные комплексы для их реализации. Теоретически обосновано последовательное использование методов LURR и СРП в рамках общепризнанных концепций тектоники плит и разрушения в области очага подготовки сильных землетрясений. Обоснован выбор основных параметров моделей (настроек алгоритмов) для получения объективного результата по всем расчетным областям, характеризующих высокую воспроизводимость полученных результатов.

ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ LURR И СРП ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА О. САХАЛИН ПО ДАННЫМ КАТАЛОГОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

3.1 Анализ сейсмичности о. Сахалин методом LURR

Подход для среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR (load/unload response ratio) [Yin, 1995; Development of a new approach..., 2001], который ранее в российской практике не использовался, изложен в главе 2. Этот подход позволяет идентифицировать опасность реализации сильного сейсмического события в локальной области (до 200 км) и определяет период тревоги от нескольких месяцев до двух лет. Основным ограничением для широкого применения данного метода были характерные для прогнозных методик моменты: низкий уровень воспроизводимости результата и отсутствие оперативных реализаций. На сегодняшний день эти вопросы не решены, хотя авторы продолжают работу над методикой, в том числе в области автоматизации и повышения сложности компьютерных расчетов [Feng et al., 2012]. В данной главе наша задача представить универсальный подход для использования каждого из методов для Сахалинских каталогов землетрясений, а также оценить результаты применительно к задачам прогноза сильных землетрясений. Основные результаты по исследованию сейсмического режима методом LURR представлены в работах [Богинская, 2017; Развитие методов..., 2018; Среднесрочный прогноз..., 2018; Изучение сейсмического..., 2018; Закупин, 2019; Геофизические исследования..., 2019; Kostylev et al..., 2019], а методом СРП в [Закупин и др., 2019; Закупин и др., 2020]. Анализ сейсмичности Сахалина проводился по данным трех каталогов, что фактически определено стадиями развития сейсмической сети. Расчетные зоны представляли собой эллипсы (с осями в меридиональном и широтном направлениях в 1 градус), а методика расчета изложена в предыдущей главе. Первый каталог сейсмической сети ИМГиГ ДВО РАН [New Architecture..., 2014], которая функционировала на Сахалине с 2006 по 2016 год и охватывала северную его часть (от 50.0° до 54.0° с.ш.). Второй [Каталог..., 2011] охватывает южную часть в период с 2000 по 2010 гг., данные по нему были расширены до 2017 года по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН. Третий каталог Л.Н. Поплавской включает всю территорию Сахалина [Региональный..., 2006] для анализа землетрясений с 1906 по 2005

гг. Использование различных каталогов оправдано тем, что удастся охватить максимальное количество сильных землетрясений на Сахалине, отправной точкой стал 1988 год. С этого времени до 2017 года землетрясений с магнитудой $M > 5.5$ произошло семь (таблица 3.1).

За этот тридцатилетний период методом площадного и временного сканирования (подробно в главе 2) было выделено шесть вариаций LURR превышающих фоновый уровень в несколько раз (рисунок 3.1). Области, в которых выделены соответствующие вариации, отмечены на карте цифрами, которые также указаны на графиках LURR. Восьмое по счету землетрясение (Крильонское) меньше по магнитуде, чем 5.5, однако занесено в список, так как произошло в период тревоги, объявленной по последней аномальной вариации LURR.

Таблица 3.1 - Землетрясения с $M_w > 5.5$ на Сахалине в период с 1988 по 2017 гг.

№	Название	Дата	Координаты	Магнитуда
1	Нефтегорское	27.05.1995 г.	142.7° в.д., 52.5° с.ш.	$M_w=7.2$
2	Углегорское	04.08.2000 г.	142.4° в.д., 48.8° с.ш.	$M_w=6.7$
3	Пильтунское	12.06.2005 г.	143.7° в.д., 52.7° с.ш.	$M_w=5.6$
4	Горнозаводское	17.08.2006 г.	141.9° в.д., 46.6° с.ш.	$M_w=5.6$
5	Невельское	02.08.2007 г.	141.7° в.д., 46.8° с.ш.	$M_w=6.2$
6	Уангское	16.03.2010 г.	142.2° в.д., 52.1° с.ш.	$M_w=5.7$
7	Онорское	14.08.2016 г.	142.4° в.д., 50.4° с.ш.	$M_w=5.8$
8	Крильонское	23.04.2017 г.	142.0° в.д., 46.1° с.ш.	$M_w=5.0$

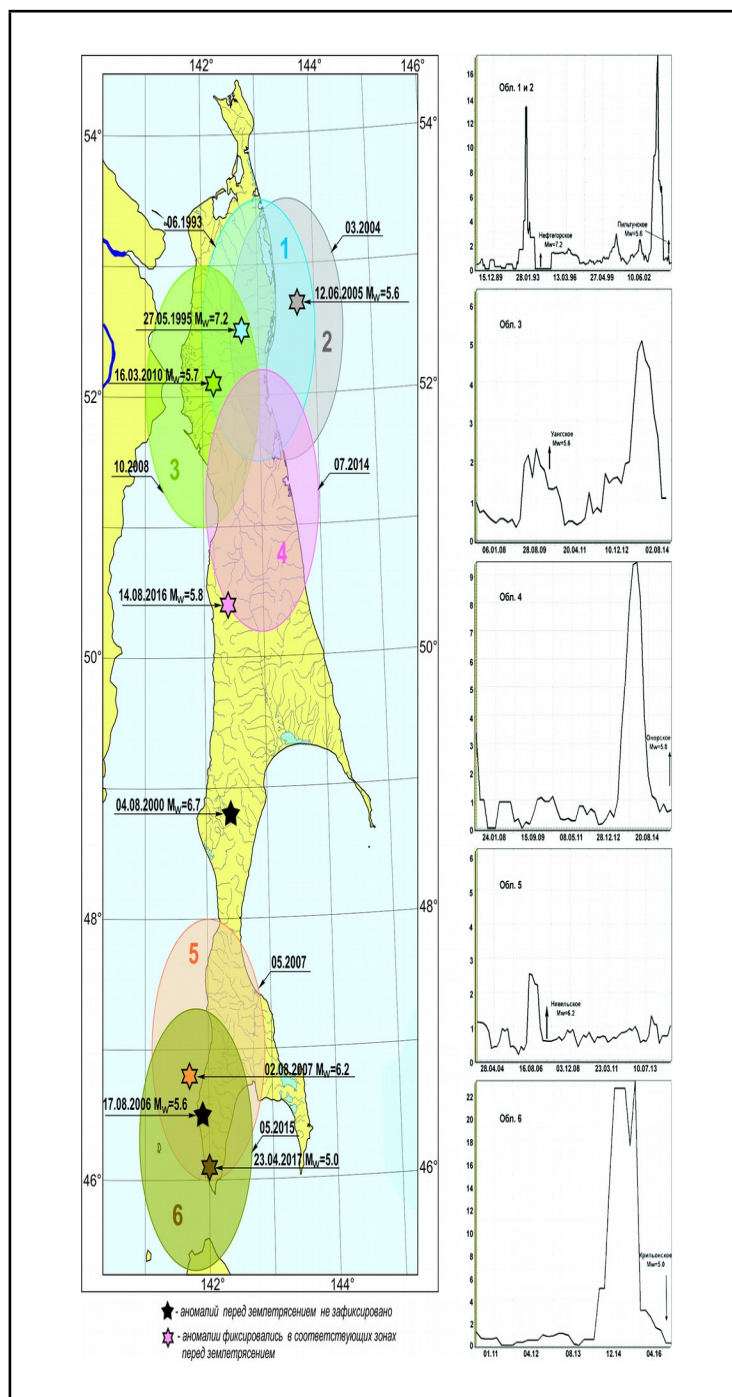


Рисунок 3.1 - Карта о. Сахалин с указанием областей и периодов времени, в которых фиксировались аномалии LURR с 1988 по 2017 гг.

Примечание: Звездочками указаны землетрясения: по цвету области аномальных значений – произошедшие в период тревоги, черный цвет – произошли вне периодов аномальных значений LURR

Шесть из восьми вариаций определяют периоды тревоги в соответствующих зонах на 24 месяца (см. главу 2), которые покрывают даты всех землетрясений кроме №2 и №4. Точность определения места высокая – все события вошли в области аномальных

значений параметра (Онорское произошло на краю области). Есть причины, которыми можно объяснить отсутствие данных четвертому землетрясению. Горнозаводское (17.08.2006 г., $M_w=5.6$) землетрясение произошло ровно за год до Невельского землетрясения, причем в том же районе. Есть мнение, что оно может являться форшоком Невельского землетрясения. В этом случае появление аномалии LURR до 2006 года было бы преждевременным. Учитывая, что анализ всех зон проводился со стандартной величиной скользящего окна в 360 дней уже на этапе выделения отклика LURR в период 2006-2007 гг. было затруднительным. Ширина окна в математической обработке соответствовала временному разному между двумя землетрясениями, поэтому визуально создается впечатление о влиянии первого землетрясения на формирование предвестника второго (рисунок 3.2а). Дополнительная математическая обработка (с меньшими параметрами окна осреднения) позволила разделить два процесса (рисунок 3.2б).

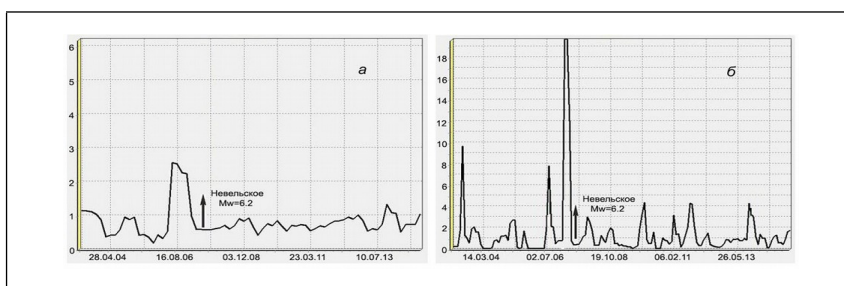


Рисунок 3.2 - а) Функция LURR, параметры расчета: окно 360 дней, сдвиг 30 дней;
б) Функция LURR, параметры расчета: окно 90 дней, сдвиг 10 дней

При этом по графику видно, что уменьшение окна обработки при недостаточной плотности событий в расчетной зоне ведет к появлению ложных тревог, а потому может использоваться только как вспомогательный инструмент. По Углегорскому землетрясению (№2 в таблице 3.1) можно лишь предполагать, что данных каталога на тот период было просто недостаточно (меньшая плотность покрытия сети между 48 и 50 градусами северной широты до 2000 года).

Нефтегорское землетрясение 27 мая 1995 года ($M_w=7.2$). Данные о геологическом устройстве и тектонике района Нефтегорского землетрясения позволяют связать сейсморазрыв на поверхности с известным Верхнепильтунским разломом [Харахинов, 1984]. Этот разлом выявлен в 50-60-х годах путем геологической съемки и структурного бурения, а позже прослежен на профилях сейсморазведки в виде взброса, поверхность сместителя которого погружается к запад-северо-западу под углами 50-70°

[Геологическое строение..., 1979]. В приповерхностных слоях в стенках траншей наблюдается погружение поверхности сместителя сейсморазрыва в том же направлении под углами около шестидесяти градусов. Верхнепильтунский разлом четко выделяется на космических и аэрофотоснимках по резкому изменению фототонов в региональных магнитном и гравитационном полях [Геологическое строение..., 1979].

Показательно, что он, имея в целом северо-северо-восточное простирание, в районе Нефтегорска причленяется к крупнейшей тектонической линии Восточного Сахалина – меридиональному Хоккайдо-Сахалинскому взбросо-надвику [Геологическая карта..., 1992], при этом морфология последнего принципиально изменяется. Если к югу от места сочленения плоскость этого разлома характеризуется пологим падением на восток, то севернее он, так же, как и Верхнепильтунский взброс, по данным сейсморазведки приобретает западное падение сместителя [Геологическое строение..., 1979]. Исследования показали, что сейсморазрыв Нефтегорского землетрясения наследует многие черты Верхнепильтунского активного разлома, а подвижка при землетрясении представляет собой факт дальнейшего его развития, поскольку отражает тенденции его эволюции на протяжении долгого геологического времени.

Для одного из самых разрушительных землетрясений прошлого столетия зона подготовки оказалась весьма точно определена по области аномальных значений LURR (аномалия зафиксирована в июне 1993 года, рисунок 3.3).

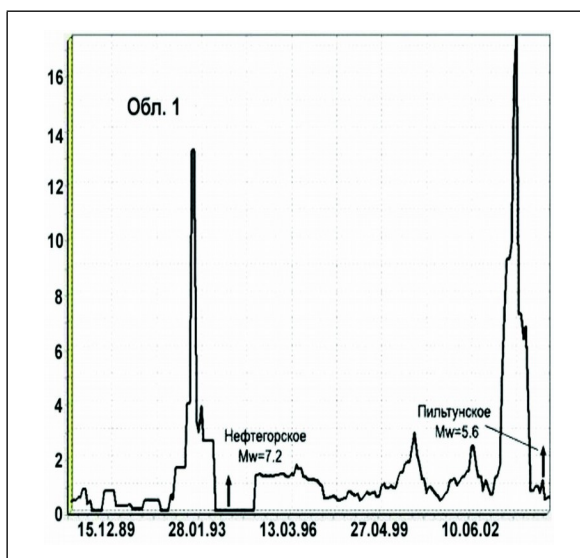


Рисунок 3.3 - Результаты расчета LURR для области №1

Этот результат стал весьма убедительным даже несмотря на очень плохое покрытие северной части острова сейсмическими станциями. На графике также хорошо

видно прекращение в 1994 году регистрации землетрясений на сеймостанции Оха (полностью была закрыта). В этой же области в наличие аномалия 2004 года, однако, её область реально находится восточнее, график области 2 приведен на рисунке 3.4.

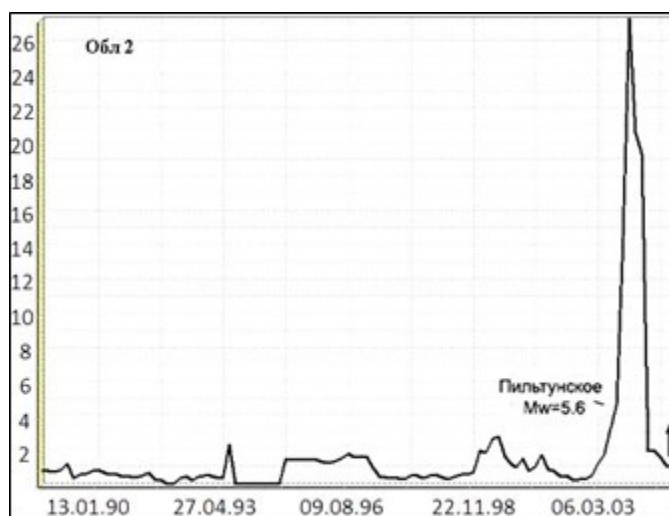


Рисунок 3.4 - Результаты расчета LURR для области №2

Пильтунское землетрясение 12 июня 2005 года ($M_w=5.6$). Рассматриваемое землетрясение 12 июня 2005 г. $M_w=5.6$ произошло у внешнего края восточного шельфа Северного Сахалина. Далее к востоку шельф сменяется 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 структурные элементы: Пильтунская впадина, Одоптинское и Восточно-Одоптинское поднятия. Мористее располагается Восточно-Сахалинский прогиб и его некомпенсированная осадками часть – замкнутая батинальная впадина Дерюгина [Воейкова и др., 2007]. Одоптинское и Восточно-Одоптинское поднятия разделены очень узким прогибом. Обе эти структуры объединяются в одно поднятие, которое с западной стороны ограничено Западно-Одоптинским разломом, к которому примыкает Пильтунская впадина. С востока это поднятие ограничено Восточно-Сахалинским разломом, к которому примыкает Восточно-Сахалинский прогиб. Сейсмичность Восточно-Сахалинской системы разломов представлена сильнейшими землетрясениями: на границе впадины Дерюгина (1944 г. $M=5.5$) и Охинско-Пильтунскими землетрясениями 1932, 1939, 1942 и 1953 гг. ($M=5.0-5.5$) [Оскорбин, 1997].

Основная часть землетрясений, которые определили данную аномалию, оказались растянуты вдоль шельфа и находятся восточнее эпицентральной области Нефтегорского землетрясения (область 2). На рисунке 3.4 показана аномалия на графике изменения параметра LURR, которая была зафиксирована в марте 2004 года.

Невельское землетрясение 2 августа 2007 года ($M_w=6.2$). Землетрясение произошло в Татарском проливе и приурочено к зоне Западно-Сахалинского глубинного разлома [Харахинов и др., 1984]. Согласно тектоническим картам Сахалина район Невельского землетрясения располагается на юго-западной подводной окраине Сахалина, образованной западным склоном Камышового поднятия. По данным [Ломтев и др., 2007]. Камышовое поднятие формирует фронт крупной Западно-Сахалинской коровой тектонической пластины. Западно-Сахалинский глубинный разлом протягивается вдоль восточного берега Татарского пролива и почти на всем протяжении скрыт под его водами. На суше острова он появляется лишь в районе мыса Ламанон. Зона в целом является северным продолжением региональной зоны восточного ограничения единой задуговой котловины Японского моря и Татарского пролива, то есть структурой более высокого порядка, чем Центрально- и Восточно-Сахалинская зоны. Она чаще всего интерпретируется как граница между Охотоморской и Амурской (Евразийской) плитами [Особенности переходной зоны..., 2017]. Очаг находился в условиях субширотного близгоризонтального сжатия. Тип подвижки в очаге – взброс с небольшой сдвиговой компонентой.

Сейсмичность в южной части острова Сахалин активнее, чем в других частях, а сеть станций плотнее. Это увеличивает выборку, которая в итоге используется в алгоритме LURR. Как видно на примере Невельского землетрясения (рисунок 3.5), в этом случае при обработке в спокойные периоды (отсутствие аномалий) дисперсия параметра LURR уменьшается и он фактически равен 1 (в отличие от графика на рисунке 3.3., где в каталоге данных значительно меньше). Соответственно и двукратное превышение получается убедительным по уровню фона, несмотря на значительную разницу в абсолютных значениях с другими аномалиями. Одна из самых непродолжительных задержек была зафиксирована в области аномальных значений №5 с мая 2007 до августа 2007 года. Отметим, что ранее было показано, как было уточнено точное положение аномалии во времени для данного события (на окне в 360 дней её положение приходится на август 2006 года, что совпадает с датой Горнозаводского землетрясения).

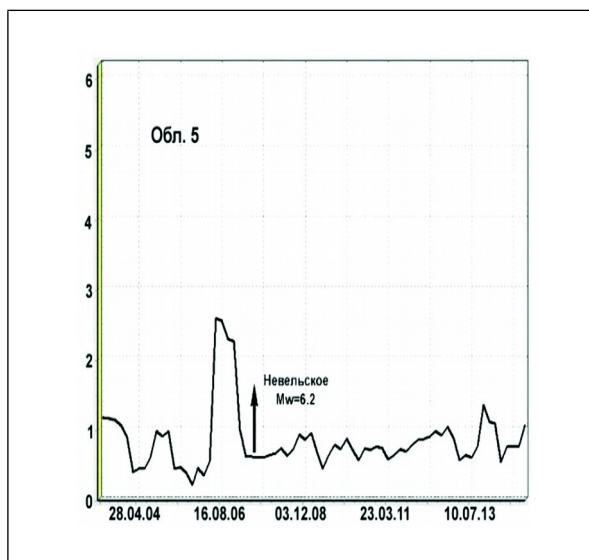


Рисунок 3.5 - Результаты расчета LURR для области №5

Уангское землетрясение 16 марта 2010 года ($M_w=5.7$). Землетрясение произошло в северо-западной части о. Сахалин в верховьях рек Уанга и Погиби. Подвижка в очаге землетрясения 16 марта 2010 г., имела взбросо-сдвиговый тип и произошла в условиях субширотного сжатия. Направление простираения одной из главных плоскостей сейсморазрыва достаточно четко согласуется с ориентацией системы Энгизпальских меридиональных разрывов Центрально-Сахалинского глубинного разлома, что позволило сделать вывод, что разрыв в очаге произошел по плоскости, ориентированной субмеридионально, в зоне сближения Центрально-Сахалинской и Западно-Сахалинской зон активных разломов. 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 [Харахинов и др., 1984].

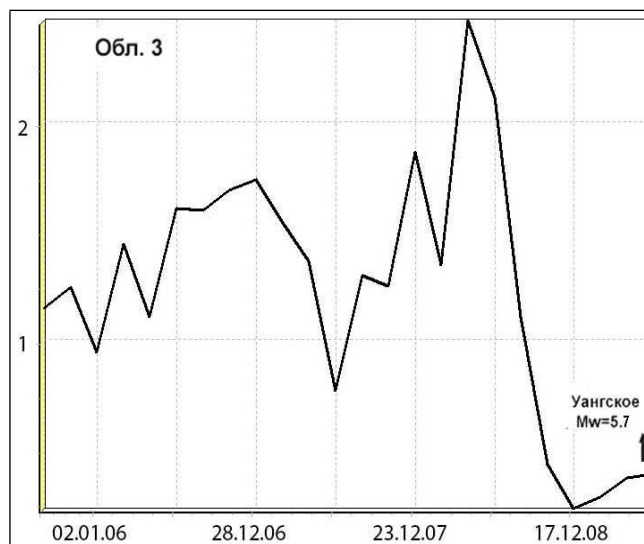


Рисунок 3.6 - Результаты расчета LURR для области №3

Аномалия LURR для Уангского землетрясения самая слабая, хотя и превышает средние значения больше чем в 2 раза. Землетрясение произошло в области аномалии через 17 месяцев после её появления (рисунок 3.6).

По первым четырем землетрясениям из таблицы 1 данные были получены исключительно ретроспективно, а землетрясения 2016 года (Онорское) и 2017 года (Крильонское) рассматривались в оперативном режиме. Ниже приведем детализацию для этих двух оперативных прогнозов.

Онорское землетрясение 14 августа 2016 года ($M_w=5.8$). В соответствии с расчетом механизма подвижка в очаге землетрясения 14 августа 2016 г. произошла под действием северо-восток – юго-западных напряжений сжатия, тип сейсмодислокации – взброс со сдвиговой компонентой. Одна из возможных плоскостей разрыва ориентирована на север и падает на восток, другая имеет юго-восточное простирание и более круто падает на юго-запад. В эпицентральной зоне Онорского землетрясения 14 августа 2016 года Западно-Сахалинское поднятие ближе всего расположено к Восточно-Сахалинскому поднятию и отделяется от него узкой частью Тымь-Поронайской впадины. По данным [Оскорбин, 1997] здесь проходит область контрастного сочленения Тымь-Поронайской впадины и Центрально-Сахалинского взбросо-надвига, об активности которой свидетельствует возникновение землетрясений.

В работе [Закупин, 2016б] был продемонстрирован результат анализа данных с 2006 по 2015 гг., который свидетельствовал об «опасности в северной части Сахалина, которая будет сохраняться до октября-ноября 2016 года» [Закупин, 2016б]. Магнитуда прогнозируемого события оценивалась в рамках модели LURR и должна была быть

больше 5.5. Вероятность, с учетом успешных ретроспективных оценок методом LURR для Сахалина, была очень высокой. Однако на тот момент формулировка «на Севере» Сахалина (от 51.0° до 55.0° с.ш.) оставалась слабым звеном для локализации очага будущего события. Для уточнения прогноза в пространственной области впервые был проведен анализ нескольких расчетных зон (см. гл.2). Уточнение места будущего землетрясения с помощью разбиения на зоны указало на то, что вероятность больше в части Сахалина между 51.0° и 53.0° с.ш. По уточненным данным на заседании Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (протокол №3 от 16.03.2016 г.) был сделан доклад. На нём сообщалось, что до конца 2016 года на острове Сахалин в северной его части между 52.0° и 53.0° с.ш. ожидается землетрясение магнитудой выше 5.5 (рисунок 3.7). По представленному докладу было принято решение уделить повышенное внимание к развитию сейсмического процесса на широтах 52.0° - 53.0° .

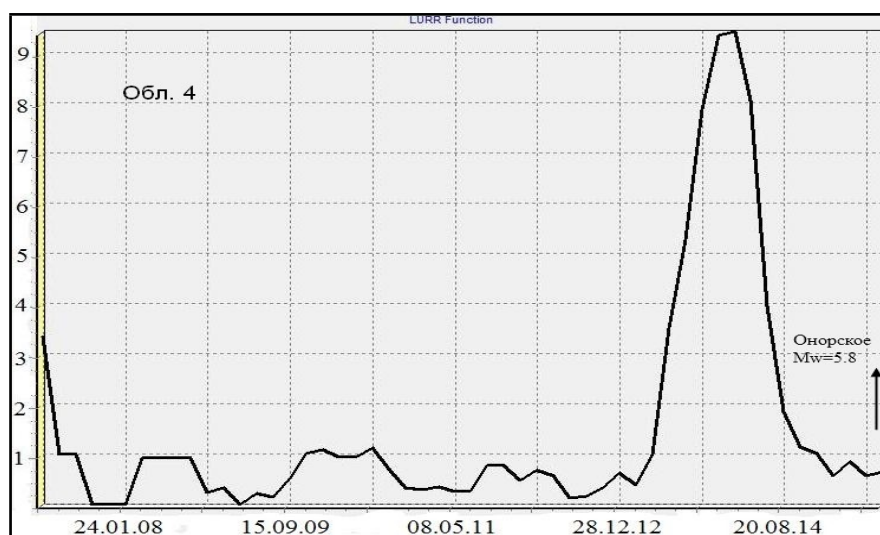


Рисунок 3.7 - Результаты расчета LURR для области №4

В июне 2016 года разработчиком программного комплекса «Seis-ASZ» [Закупин, 2016а; Закупин, 2016б] для анализа LURR предложен дополнительный инструмент для уточнения прогноза в пространственной области на имеющемся функционале. Этот инструмент позволил выделить землетрясения, расчет которых дал основной вклад в аномальные значения LURR. 16 землетрясений определивших аномалию LURR перед Онорским землетрясением располагаются между 51.0° и 53.0° с.ш. и 142.0° и 144.0° в.д. Основная группа событий (14 из 16) находится в области: 50.8° - 52.2° с.ш.; 142.0° - 143.7°

в.д. С 2012 по 2015 гг. именно здесь происходили самые сильные события в северной части Сахалина ($4.0 < M_w < 5.0$). Результат дополнительных расчетов по уточнению зоны подготовки ожидаемого землетрясения очевиден – она должна находиться ближе к центральной части острова, нежели на севере. Этот результат улучшил данные прогноза, хотя эпицентр события и оказался на краю области (рисунок 3.1).

Крильонское землетрясение 23 марта 2017 года ($M_w=5.0$). Магнитуда главного толчка $M=5.0$, глубина очага землетрясения 10 км, что говорит о его расположении в коре и соответствует основным данным о тектонике Южного Сахалина. Оскорбиным Л.С. на основе совместного рассмотрения сейсмологических, структурно-тектонических и геофизических данных в районе п-ова Крильон были выделены три смежные сейсмогенные зоны: Юго-Западная Сахалинская шельфовая зона (ЮЗШ), Юго-Западная Сахалинская зона (ЮЗХ) и Анивская зона (АНВ). Наиболее активная из них - Юго-Западная Сахалинская шельфовая зона, территория которой плотно покрыта эпицентрами землетрясений с магнитудой $M=5.0 \pm 0.1$. Сейсмическая активность в ЮЗШ определяется тектоническими особенностями системы Западно-Сахалинских разломов. Анивская зона включает в себя депрессию залива Анива, состоит из подводного продолжения структур Южно-Сахалинской впадины и Сусунайско-Анивского поднятия. Сейсмичность представлена немногочисленными землетрясениями с $M < 4.0$, эпицентры которых расположены вблизи границ с соседними зонами. ЮЗШ и АНВ зоны граничат с Юго-Западной Сахалинской зоной, основным дизъюнктом которой является Центрально-Сахалинской взбросо-надвиг, вдоль и вкрест которого имеются нарушения различной ориентации и протяженности. Основная сейсмичность отмечена в её южном сегменте этой зоны, а максимальное землетрясение с $M=5.5$ произошло в 1951 г. на глубине 10 км [Оскорбин, 1997]. Ориентированность афтершокового облака Крильонского землетрясения в направлении от ЮЗШ к АНВ и пересечение им Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов указывает на сложную тектоническую позицию, хотя и согласуется с поведением функции LURR в различных областях этих сейсмогенных зон [Закупин, 2018].

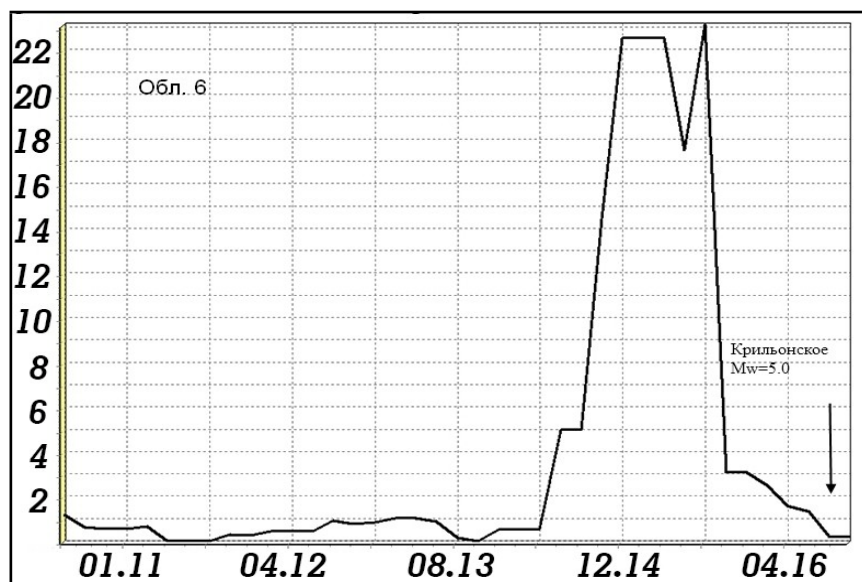


Рисунок 3.8 - Результаты расчета LURR для области №6

В расчетах LURR был задействован весь южный Сахалин и север Хоккайдо (рисунок 3.9а). В зонах 4 и 5 были обнаружены признаки значительного превышения порога в апреле-мае 2015 года (пример результата по зоне 5 на рисунке 3.9б).

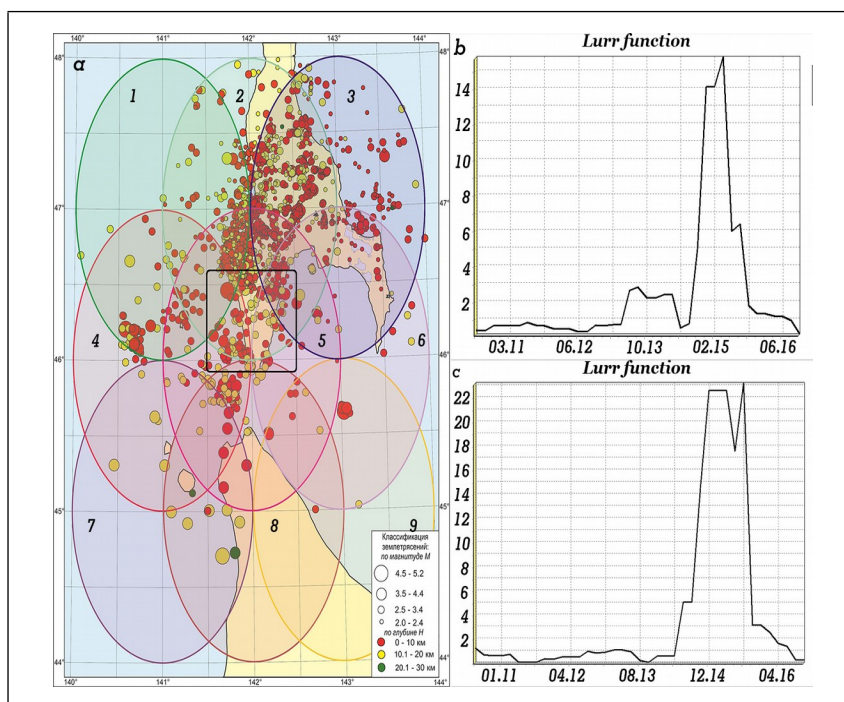


Рисунок 3.9 - а) На карте показаны расчетные области и землетрясения с 2011 года по март 2017 гг.; б) Результаты расчета LURR для области №5; в) результат расчета LURR для прямоугольной области

Параметр LURR (рисунок 3.8) вернулся к фоновым значениям лишь к началу 2016 года. Эти расчеты были проведены в ИМГиГ ДВО РАН в начале 2017 года, а в марте 2017 года были доложены на заседании Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (протокол № 2 от 16.03.2017 г.). Учитывая, что больше аномалия отражалась в пятой зоне, было решено сдвинуть зону аномального значения LURR (рисунок 3.1) немного западнее, но расположить её ближе к пятой зоне. В прогнозе указывалось, что до апреля-мая 2017 года в районе ЗСР западнее п. Крильон вероятно появление землетрясения с магнитудой выше 5.5. Через месяц (23.04.2017 г.) произошло землетрясение, названное Крильонским, однако с магнитудой всего $M_w=5.0$, причем произошло оно именно в этой зоне. С учетом большой представительности современного каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН после землетрясения путем перебора прямоугольных зон меньшего размера было установлено положение зоны, где максимально отражен предвестник 2015 года (рисунок 3.9а, черный прямоугольник). Расчет LURR для этой прямоугольной области показан на рисунке 3.9с. Результаты расчетов в зонах меньшего размера, в том числе зонах Западно-Сахалинского (ЗСР) и Центрально-Сахалинского (ЦСР) разломов показаны на рисунке 3.10.

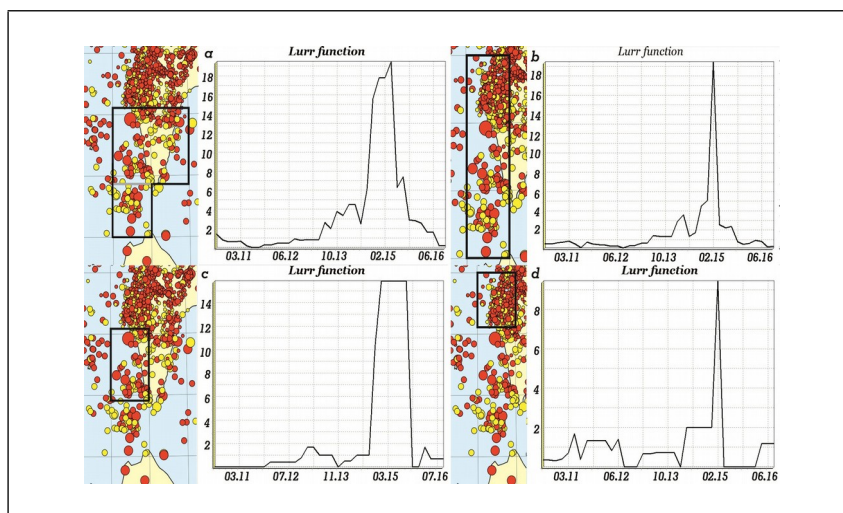


Рисунок 3.10 - Результаты расчетов. Показаны расчетные области и графики LURR

Результаты подтвердили параметры аномалии 2015 года в установленных ранее зонах, а также свидетельствовали о том, что сформировалась аномалия в основном в зоне ответственности ЗСР.

В таблице 3.2 приведены ожидаемые значения параметров по прогнозам в шести аномальных зонах (данные ретроспективного анализа сейсмичности Сахалина с 1988 по 2017 гг.) и фактические (наблюденные) значения.

Таблица 3.2 - Результаты ретроспективного анализа

	Ожидаемые параметры			Наблюденные параметры		
	M_w	L (±1°)	t, время	M_w	L (±1°)	t, время
Нефтегорское	>5.5	143.0° в.д. 52.5° с.ш.	до 2 лет	7.2	142.7° в.д. 52.5° с.ш.	18 месяцев
Пильтунское	>5.5	143.0° в.д. 52.5° с.ш.	до 2 лет	5.6	143.7° в.д. 52.7° с.ш.	15 месяцев
Невельское	>5.5	142.0° в.д. 47.0° с.ш.	до 2 лет	6.2	141.7° в.д. 46.8° с.ш.	3 месяца
Уангское	>5.5	142.0° в.д. 52.0° с.ш.	до 2 лет	5.7	142.2° в.д. 52.1° с.ш.	17 месяцев
Онорское	>5.5	143.0° в.д. 51.2° с.ш.	до 2 лет	5.8	142.4° в.д. 50.4° с.ш.	24 месяца
Крильонское	>5.5	141.8° в.д. 46.3° с.ш.	до 2 лет	5.0	142.0° в.д. 46.1° с.ш.	23 месяца

Примечание – Время от момента обнаружения предвестника до прогнозируемого события (t); положение эпицентра (L)

Из результатов в таблице 3.2 можно сделать несколько выводов. Помимо главного вывода об удовлетворительной сходимости параметров, важно отметить, что амплитуда аномалии LURR (прогнозного признака) зависит от математической обработки и, вероятно, не связана с энергией будущего землетрясения. Напротив, время возникновения «скачка» практически не зависит от обработки, а, следовательно, очень интересным выглядит корреляция между временем подготовки события и его энергией.

3.2 Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом

СРП на примере Невельского землетрясения 2007 года.

Данный раздел фактически является продолжением работ, проведенных в ИМГиГ ДВО РАН И.Н. Тихоновым, который впервые использовал метод СРП для Сахалина. Ретроспективно было проведено моделирование по методу СРП для юга о. Сахалин на детальном каталоге землетрясений с $M \geq 2.6$ за 12-летний (2003-2014 гг.) период наблюдений для восьми ЗЛТ с $M \sim 4.6-6.2$. Для каждого из них получены даты реализации прогнозов. При этом ошибка прогноза во времени составила не более суток. Авторы отмечали, что реальная точность прогноза могла бы быть выше при наличии более

детального ($M \geq 2.0$) каталога землетрясений, получаемого в реальном времени, по югу о. Сахалин [Тихонов и др., 2017]. Несмотря на ретроспективные оценки ожидаемого события с точностью до минут присутствовали проблемы в его реализации на практике. Одна из них — «залипание» прогнозной оценки времени сильнейшего толчка к концу обрабатываемой активизации в случае ее резкого ступенчатого нарастания. «Ступенька» может расти в течение 10 и более дней, а метод все это время будет давать прогноз, что ожидаемое землетрясение произойдет завтра. При этом «ступенька» может завершиться и без такого землетрясения. Понятно, что это неприемлемо. Но есть, и другая проблема и состоит она в выборе расчетной области для оперативного прогнозирования. Размер очаговой области для землетрясений с магнитудой от 4.0 до 6.0 не может быть более 100 км, ну а с позиций сейсмотектонической модели Сахалина такие размеры на Юге острова и вовсе перекрывают сразу несколько сейсмогенерирующих областей [Левин и др., 2012]. Реальные размеры могли бы быть от 30 до 50 км. Ну а главным и очевидным минусом для полученных результатов является необходимость в «настройке» алгоритма или точнее — параметров для реализации моделей СРП, причем универсальностью они не отличаются. Такой подход даёт повод для сомнений в пользе от метода в условиях реального времени, поэтому актуально выполнить проверку алгоритма в наиболее универсальных условиях, следовать четкой схеме при расчетах. Наилучшим вариантом для метода СРП (в целях его дальнейшего комплексирования с методом LURR) может быть землетрясение в Невельске в августе 2007 года ($M_w=6.2$). Во-первых, в южной части острова сейсмическая сеть наиболее развита, а во-вторых, один из главных результатов авторов из ИМГиГ ДВО РАН [Тихонов, 2008] был получен на Сахалине именно для этого события. Для качественного продолжения результатов работ наших коллег [Тихонов, 2008], а точнее выработке подходов для применения метода СРП в двухстадийной схеме оценки опасности, предлагаются следующие условия по работе с данными:

- каталог будет подготовлен только для анализа зоны западно-сахалинского разлома с отсечением по долготе в 142.2 градуса;

- анализ будет проведен в авторской редакции на обработке каталога слабых сейсмических событий (с магнитудой не более 3.0), дополнительно будет выполнен расчет и для полного каталога без ограничений по магнитуде;

- исследуемая территория разделяется на 28 областей по 40 км радиусом (приемлемый размер для очаговых областей землетрясений с $M > 6.0$), которые попарно пересекаются с площадью перекрытия не менее 65% (рисунок 3.11);

● для всех областей точкой для начала анализа будет январь 2007 года – к этому моменту заметно снижается процесс афтершоковой релаксации Горнозаводского землетрясения августа 2006 года.

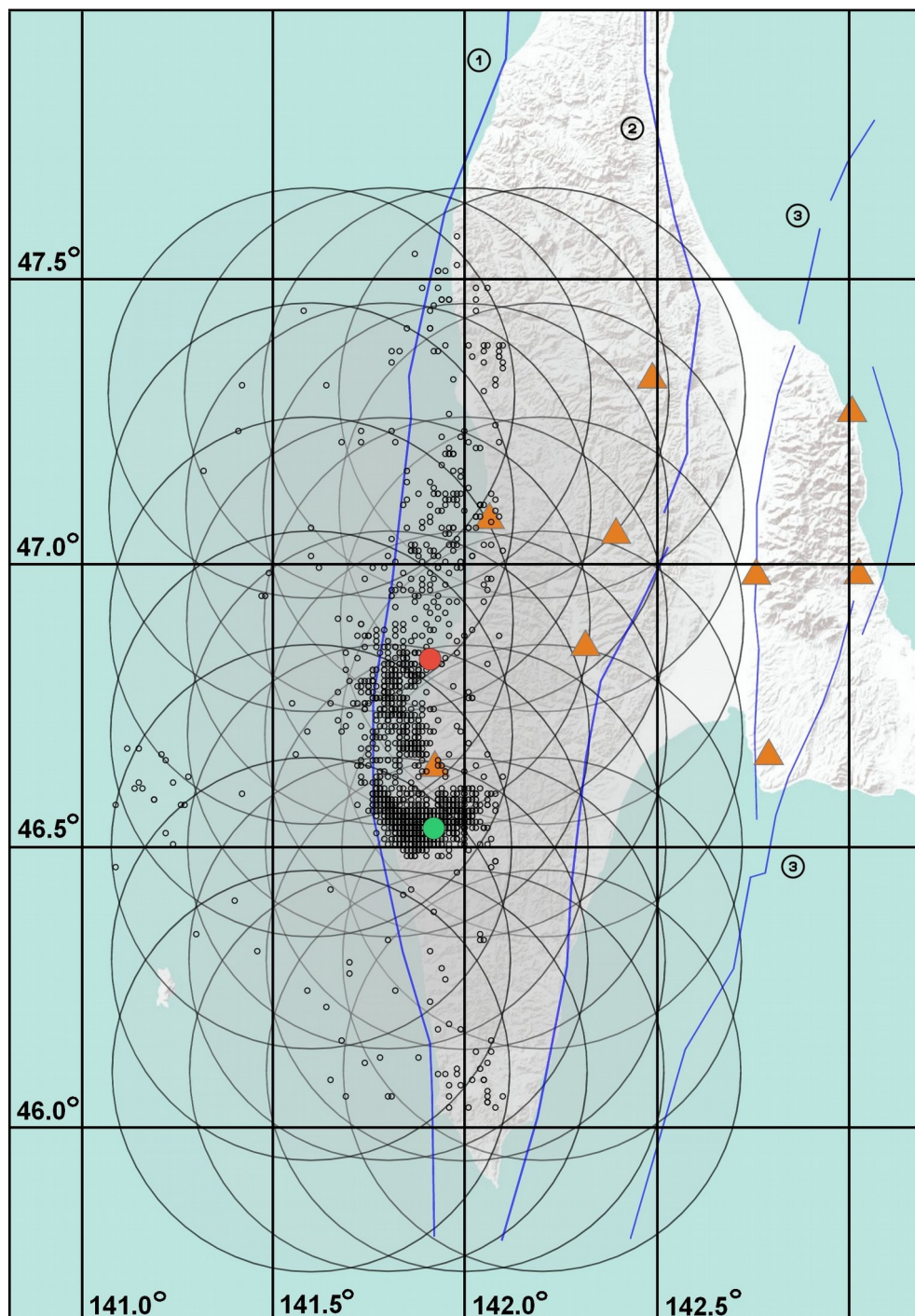


Рисунок 3.11 - Карта распределения сейсмических событий в зоне ЗСР с 2004 г. по 08.02.2007 с указанием расчетных областей для метода СРП.

Примечание: Красный круг – эпицентр Невельского ЗЛТ, зеленый – эпицентр Горнозаводского ЗЛТ. Треугольники – сеть автономных полевых станций юга о. Сахалин

по состоянию на 2007 г. Разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Сусунайский [Харахинов, 2010].

В каждой области по мере накопления (ретроспективно, начиная с января 2007 г.) данных проводятся расчеты в программе «SeisDynamycView» и при наличии решения СРП фиксируются его параметры: длительность СРП и время до реализации прогноза после фиксации решения. Данные заносятся в таблицу только для последнего СРП. На рисунке 3.12 показан пример для зоны с координатами 46.7N 142.0E. В качестве примера решения для четырех зон на широте 46.7 градуса показаны на рисунке 3.13.

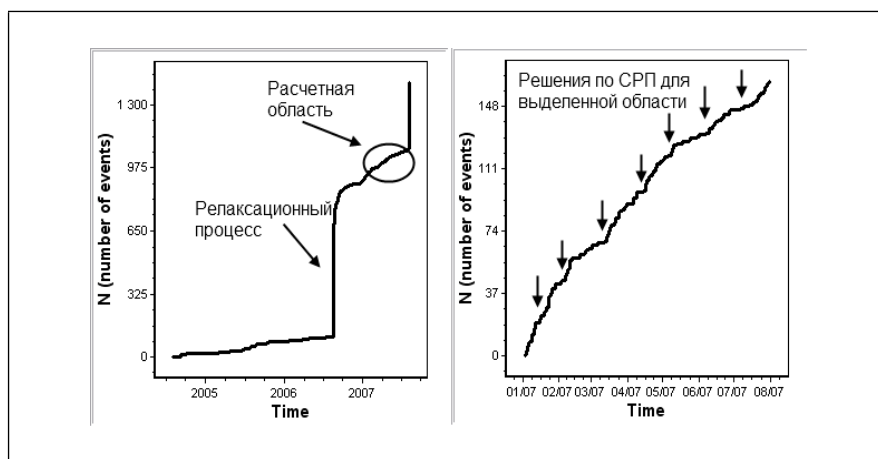


Рисунок 3.12 - Активность в зоне 46.7N 142.0E ($R=40$ км) (слева) с указанием области афтершоковой релаксации после Горнозаводского землетрясения 2006 года, а также расчетной области для моделирования СРП (с января по июль 2007 г.). Справа – масштабирование расчетной области (стрелками показаны все имеющиеся решения СРП)

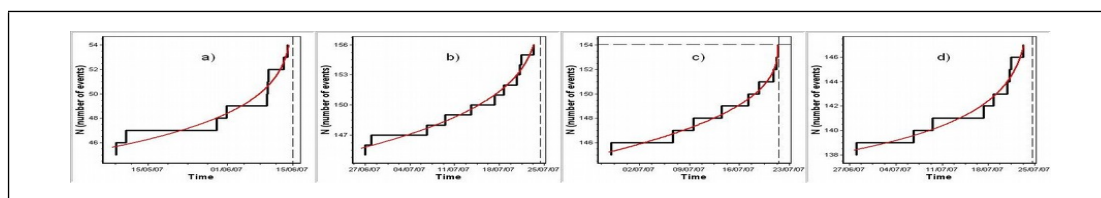


Рисунок 3.13 - Решения для зон с центром: а) 46.7N 141.6E; б) 46.7N 141.8E; в) 46.7N 142.0E; г) 46.7N 142.2E

Результаты расчетов для всех зон и двух каталогов (ЗЛТ с магнитудами $M \leq 3$ и полного каталога ЗЛТ) сведены в таблице 3.3. За основные показатели выбраны:

Таблица 3.3 - Результаты расчета СРП для землетрясений, предшествующих землетрясению в Невельске 02.08.2007 г. (t_1) с $M_w=6.2$

Коор-ты расчетных зон (широта °N, долгота °E)	Дата		Длительность, в днях		Кол-во СРП
	начала выборки последнего СРП, t_2	окончания выборки последнего СРП, t_3	СРП, $t_4 = t_3 - t_2$	паузы до главного толчка после получения решения, $t_5 = t_1 - t_3$	
46.1N, 141.6E	–	–	–	–	–
46.1N, 141.8E	10.04.2007	05.05.2007	24	89	1
	26.02.2007	02.05.2007	65	92	1
46.1N, 142.0E	31.05.2007	05.05.2007	34	89	1
	24.02.2007	02.05.2007	67	92	1
46.1N, 142.2E	24.02.2007	03.05.2007	65	91	1
	24.02.2007	02.05.2007	67	92	1
46.3N, 141.6E	19.04.2007	14.06.2007	55	49	2
	08.05.2007	14.06.2007	37	49	3
46.3N, 141.8E	06.07.2007	29.07.2007	22	4	7
	06.07.2007	27.07.2007	20	6	6
46.3N, 142.0E	06.07.2007	28.07.2007	21	5	6
	06.07.2007	26.07.2007	19	7	7
46.3N, 142.2E	27.06.2007	27.07.2007	30	6	6
	06.07.2007	26.07.2007	19	7	8
46.5N, 141.6E	08.05.2007	13.06.2007	36	50	2
	08.05.2007	14.06.2007	37	49	2
46.5N, 141.8E	27.06.2007	21.07.2007	24	12	6
	06.07.2007	21.07.2007	14	12	6
46.N, 142.0E	27.06.2007	28.07.2007	31	5	7
	06.07.2007	23.07.2007	17	10	7
46.5N, 142.2E	27.06.2007	27.07.2007	30	6	6
	27.06.2007	26.07.2007	29	7	7
46.7N, 141.6E	08.05.2007	14.06.2007	37	49	2
	08.05.2007	13.06.2007	36	50	3
46.7N, 141.8E	27.06.2007	21.07.2007	23	12	7
	27.06.2007	23.07.2007	26	10	8
46.7N, 142.0E	27.06.2007	27.07.2007	29	6	7
	27.06.2007	21.07.2007	23	12	7
46.7N, 142.2E	27.06.2007	27.07.2007	30	6	7
	27.06.2007	23.07.2007	25	10	6
46.9N, 141.6E	20.03.2007	17.04.2007	27	107	2
	20.03.2007	17.04.2007	27	107	2
46.9N, 141.8E	29.03.2007	18.04.2007	20	106	2
	20.05.2007	21.07.2007	61	12	3
46.9N, 142.0E	09.06.2007	26.07.2007	46	7	4
	23.05.2007	27.06.2007	35	6	4
46.9N, 142.2E	20.05.2007	29.07.2007	69	4	3
	09.06.2007	22.07.2007	43	11	2
47.1N, 141.6E	29.01.2007	18.04.2007	79	106	1
	18.02.2007	18.04.2007	59	106	1
47.1N, 141.8E	02.05.2007	02.07.2007	61	31	3
	12.06.2007	22.07.2007	40	11	2
47.1N, 142.0E	02.05.2007	02.07.2007	61	31	2
	20.05.2007	02.07.2007	42	31	2
47.1N, 142.2E	02.05.2007	02.07.2007	61	31	2
	25.04.2007	02.07.2007	68	31	2
47.3N, 141.6E	–	–	–	–	–
47.3N, 141.8E	18.04.2007	02.07.2007	74	31	1
	18.04.2007	02.07.2007	74	31	2
47.3N, 142.0E	13.04.2007	22.07.2007	100	11	1
	13.04.2007	22.07.2007	100	11	2
47.3N, 142.2E	12.04.2007	22.07.2007	101	11	1
	12.04.2007	22.07.2007	101	11	2

Примечание: Верхняя строка – результаты расчетов для каталога ЗЛТ с магнитудами $M \leq 3.0$, нижняя – для полного каталога ЗЛТ

длительность СРП (t_4), время до главного толчка после получения решения (t_5), количество независимых решений для всей расчетной области.

В зонах, включающих в себя эпицентральною область будущего (Невельского) землетрясения или предыдущего Горнозаводского наблюдаются многочисленные (до 8) активизации, определенные в расчете как СРП. Средняя длительность последних СРП в зонах составляет порядка месяца, хотя в краевых зонах (удаленных от эпицентральной области) наблюдаются их максимальные значения, которые достигают 100 дней (характерно для зон с низкой активностью). Характерным параметром СРП, наравне с горизонтальными и вертикальными асимптотами, является показатель α , определяющий вид кривой - парабола (при $\alpha < 1$), экспонента ($\alpha = 1$), гипербола ($1 < \alpha < 2$), логарифмическая зависимость ($\alpha = 2$), супергипербола (при $\alpha > 2$). Для всех решений параметр α приведен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Значения α для полученных решений СРП

Координаты расчетных зон	Кол-во СРП	Параметр α							
		α	α	α	α	α	α	α	α
46.1 N, 141.6 E	—	—	—	—	—	—	—	—	—
46.1 N, 141.8 E	1	2.0	—	—	—	—	—	—	—
	1	2.8	—	—	—	—	—	—	—
46.1 N, 142.0 E	1	2.5	—	—	—	—	—	—	—
	1	3.0	—	—	—	—	—	—	—
46.1 N, 142.2 E	1	2.7	—	—	—	—	—	—	—
	1	3.1	—	—	—	—	—	—	—
46.3 N, 141.6 E	2	3.3	2.7	—	—	—	—	—	—
	3	3.2	3.9	2.4	—	—	—	—	—
46.3 N, 141.8 E	7	3.0	2.5	5.0	2.4	3.1	2.9	3.0	—
	6	2.3	2.9	2.7	3.7	3.6	3.7	—	—
46.3 N, 142.0 E	6	2.4	2.6	2.3	4.5	3.7	3.0	—	—
	7	3.0	5.0	2.0	2.9	4.3	4.5	4.1	—
46.3 N, 142.2 E	6	1.8	2.3	2.3	2.6	3.7	3.3	—	—
	8	2.3	2.2	2.3	2.9	4.5	5.8	5.7	4.1
46.5 N, 141.6 E	2	2.9	2.1	—	—	—	—	—	—
	2	5.9	2.1	—	—	—	—	—	—
46.5 N, 141.8 E	6	2.2	2.8	2.5	3.0	3.0	2.9	—	—
	6	3.0	3.3	4.1	2.2	4.0	2.6	—	—
46.5 N, 142.0 E	7	1.9	2.8	2.7	2.7	3.3	2.9	2.1	—
	7	2.2	2.6	3.5	4.1	3.1	3.8	2.4	—
46.5 N, 142.2 E	6	2.4	2.7	2.0	5.8	3.2	2.8	—	—
	7	2.6	3.3	5.1	4.2	3.2	3.1	3.2	—
46.7 N, 141.6 E	2	3.1	2.2	—	—	—	—	—	—
	3	2.5	2.6	2.2	—	—	—	—	—

46.7 N, 141.8 E	7	3.1	2.0	2.1	2.1	3.4	4.2	2.8	–
	8	3.1	2.9	2.1	4.1	4.4	2.9	3.2	2.4
46.7 N, 142.0 E	7	3.1	2.0	2.2	3.4	4.2	3.6	1.0	–
	7	3.4	2.9	4.4	4.1	3.4	3.1	2.7	–
46.7 N, 142.2 E	7	3.1	2.8	4.4	2.6	4.7	3.6	2.8	–
	6	3.1	3.2	4.1	3.1	3.6	2.0	–	–
46.9 N, 141.6 E	2	3.5	3.8	–	–	–	–	–	–
	2	4.9	3.8	–	–	–	–	–	–
46.9 N, 141.8 E	2	2.7	2.7	–	–	–	–	–	–
	3	4.2	3.3	4.8	–	–	–	–	–
46.9 N, 142.0 E	4	3.0	3.2	3.2	3.4	–	–	–	–
	4	2.7	3.4	2.9	4.6	–	–	–	–
46.9 N, 142.2 E	3	3.2	3.0	3.7	–	–	–	–	–
	2	3.5	2.5	–	–	–	–	–	–
47.1 N, 141.6 E	1	4.2	–	–	–	–	–	–	–
	1	3.2	–	–	–	–	–	–	–
47.1 N, 141.8 E	3	2.1	2.8	3.5	–	–	–	–	–
	2	2.1	2.9	–	–	–	–	–	–
47.1 N, 142.0 E	2	2.2	3.5	–	–	–	–	–	–
	2	2.2	4.0	–	–	–	–	–	–
47.1 N, 142.2 E	2	2.9	3.2	–	–	–	–	–	–
	2	2.9	3.4	–	–	–	–	–	–
47.3 N, 141.6 E	–	–	–	–	–	–	–	–	–
47.3 N, 141.8 E	1	4.4	–	–	–	–	–	–	–
	2	1.8	3.6	–	–	–	–	–	–
47.3 N, 142.0 E	1	8.9	–	–	–	–	–	–	–
	2	2.0	8.9	–	–	–	–	–	–
47.3 N, 142.2 E	1	6.6	–	–	–	–	–	–	–
	2	1.8	6.6	–	–	–	–	–	–

Примечание: Верхняя строка – значения параметра α для каталога ЗЛТ с магнитудами $M \leq 3.0$, нижняя – для полного каталога ЗЛТ

В работе [Тихонов, 2012] точные ретроспективные прогнозы для Невельского и Горнозаводского землетрясений были получены по решениям СРП длительностью 40 и 91 день соответственно, а параметр α оказался в обоих случаях равен 3.6. Данные таблицы 3.4 указывают на то, что значения параметра варьируют в широких пределах от 1 до 9, однако преобладают значения супергиперболического типа (при $\alpha > 2$). Однако удивительным представляется распределение параметра в эпицентральной области, график активности для которой представлен на рисунке 3.14. Среди 7 активизаций сейсмичности, определенных как саморазвивающиеся процессы, для которых было получено решение, лишь в одном случае зависимость является экспоненциальной (выделено полужирным в таблице 3.4), а 6 относятся к супергиперболическому типу. И очень важно то, что эта единственная активизация является последней в списке непосредственно перед Невельским землетрясением. На рисунке 3.12 видно, что

предыдущие шесть активизаций имеют очень резкие фронты, а последняя нарастает плавно.

Использование полного каталога событий (без ограничений) для некоторых зон увеличило количество СРП (ложные тревоги в задаче поиска форшоковой активности), а в распределении параметра осуществленных изменений не произошло (таблица 3.4), что приводит к заключению о приоритетности использования в работе выборки слабых сейсмических событий.

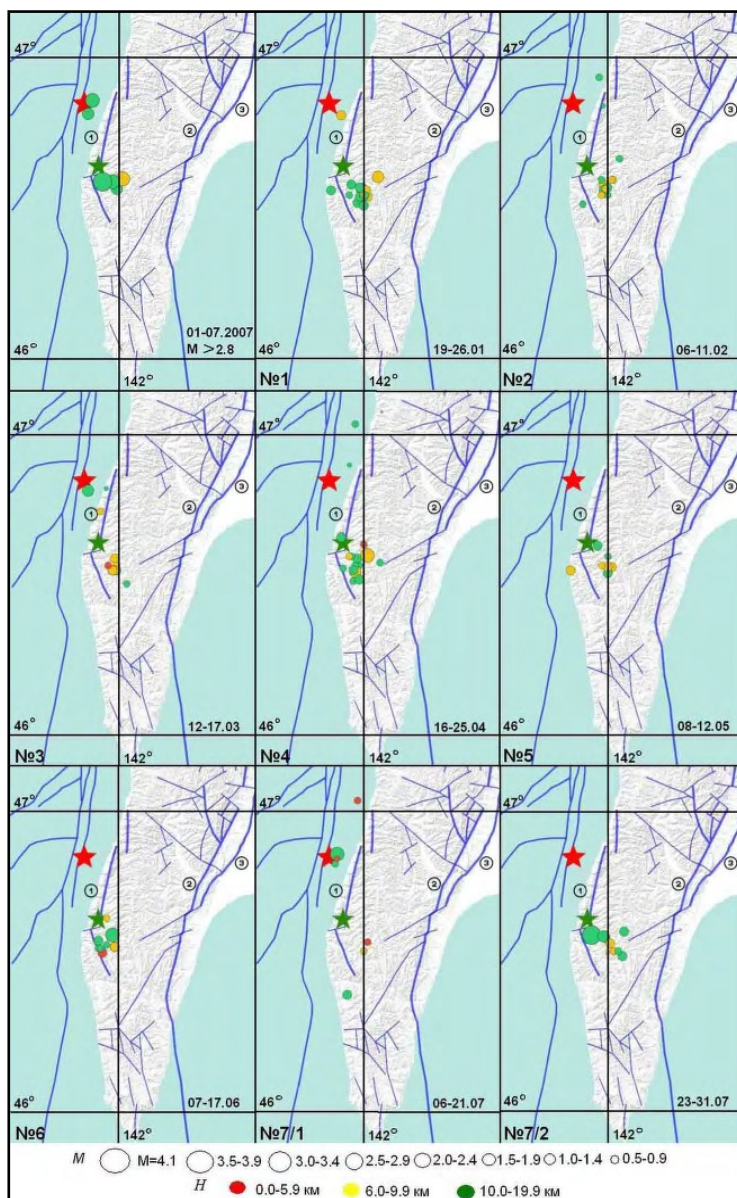


Рисунок 3.14 - Эпицентры землетрясений, произошедших в периоды активизаций (СРП)

Примечание: Красная звездочка – эпицентр Невельского землетрясения, зеленая – Горнозаводского. Синие линии – разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Сусунайский [Харахинов, 2010]

На картах рассматриваемого региона (рисунок 3.14) показаны ЗЛТ, произошедшие в те периоды времени, для которых появлялись решения по СРП. Для выделения сейсмических событий использовался каталог с января по июль 2007 г., т.е. со времени окончания релаксационного процесса после Горнозаводского землетрясения 17.08.2006 г. ($M_w=5.6$).

Выборка событий соответствует области с наибольшим количеством установленных саморазвивающихся процессов, т.е. области с центром в точке с координатами 46.7N, 142.0E и $R=40$ км. На приведенных картах видно, что все шесть (№ 1–№6) активизаций в период с января по июнь 2007 г. в основном представлены землетрясениями в эпицентральной зоне Горнозаводского ЗЛТ, что может характеризовать его афтершоковую активность. Однако параллельно с ней непосредственно в районе Западно-Сахалинского разлома в северо-западном направлении от эпицентра Горнозаводского ЗЛТ также развивается некоторая активность. Эта область представлена в основном небольшим количеством событий, однако примечательно, что в других областях в пределах данной 40-км выборки землетрясений не наблюдается вовсе. Отмечается и некоторая связь между этими двумя зонами активизации (в пределах СРП). Так, для СРП №3, который реализовался с 12 по 17 марта, первые три события с $M \leq 2.0$ произошли с 12 по 13 марта в первой области, событие 14 марта с $M=2.8$ произошло в эпицентре будущего Невельского землетрясения во второй области, а затем эти две зоны действовали попеременно. Такие же примеры можно увидеть и для других СРП. Особняком стоят СРП №5 и №6, которые реализованы без проявлений активности второй области. Такое затишье будущего очага совпадает с появлением аномалии LURR (в мае 2007 г.). [Закупин, 2016; Развитие методов..., 2018]. Метод LURR опирается на анализ каталога сейсмических событий и выделение периода, когда сейсмичность в терминологии теории развития сейсмического очага переходит от случайного накопления повреждений (диффузного) к детерминированному накоплению. Определенность состоит в том, что на этой стадии подготовлен ряд областей с высоким уровнем напряжений, в которых готовы развиваться объединения дефектов более высокого ранга (укрупнение), а они в дальнейшем сформируют магистральный разрыв (сильное землетрясение). Именно поэтому данный метод опирается на анализ землетрясений среднего уровня (по Сахалинскому каталогу диапазон определен с магнитудами от 3.3 до 5). Переход очага в такую стадию означает рост параметра LURR, который рассчитывается как отношение отклика среды на нагрузку к разгрузке. Компонента приливных напряжений в тензоре для площадки, где расположен слип-вектор, для каждого ЗЛТ

является индикатором нагрузки/разгрузки. Градиент этой компоненты (нагрузка или разгрузка) определяется моментом достижения максимальных значений фактора Кулона.

Для Невельского землетрясения аномалия LURR была обнаружена ретроспективно наряду с другими ЗЛТ Сахалина [Закупин, 2016; Развитие методов..., 2018], однако с наилучшим результатом по времени ожидания события – всего около 3 месяцев. Во взаимосвязи с результатами этой работы после среднесрочного прогнозного признака LURR остаются только 6-я и 7-я активизации (отсечены 5 активизаций СРП, не являющиеся форшоковыми процессами). В июле 2007 г. произошла реализация последнего СРП (с аномальным для таблицы решений параметром α экспоненциального типа). Началась она равномерно распределенными с севера на юг сейсмическими событиями, группирующимися вблизи Западно-Сахалинского разлома, среди которых были два сильных события во второй области ($M=3.1$, $M=2.4$), а закончилась событием в первой области с $M=4.1$ с серией слабых афтершоков. Процесс завершился за два дня до Невельского землетрясения.

Полученные результаты указывают на ограниченность явных признаков, по которым можно выделить последний СРП. Параметр α для последнего СРП был близок к единице и значительно отличался от остальных, а поскольку отмечено, что активизации наиболее близки зависимости гиперболического типа (от 1 до 1.5) [Мальшев, 2019], то результат достаточно неожиданный. Интересен и тот факт, что затишье очаговой области, в которой впоследствии возникает землетрясение, по времени совпадает с аномалией LURR (май 2007 г.), а предвестником «правильного» СРП могут быть умеренные события в будущем очаге, которые происходят в процессе активизации или в рядом расположенных активных зонах. Это показывает возможность использовать метод СРП как инструмент анализа постпредвестникового периода LURR.

Учитывая высокую вовлеченность в представленные саморазвивающиеся процессы событий в области очага Горнозаводского ЗЛТ (рисунок 3.14), проведем декластеризацию землетрясений каталога методом, изложенным в [Смирнов, 1997]. Начальный каталог, состоявший из 242 событий (с января по конец июля 2007 г.), соответствующий зоне, показанной на рисунке 3.11, после декластеризации сократился до 114 событий. Сильнее процесс отбраковки сказался на выделенной нами для расчета области (координаты 46.7N, 142.0E и $R=40$ км.), где получено максимальное количество СРП. В ней из 163 событий осталось 36.

На рисунке 3.15 отчетливо выделяются 2 процесса, они продолжительны (несколько месяцев), а последний из них впервые отмечается ретроспективно 20 июля

2007 г., после чего события 20–29 июля дополнительно генерируют сильный скачок активности (рисунок 3.15) и происходит «залипание» прогнозной оценки по времени.

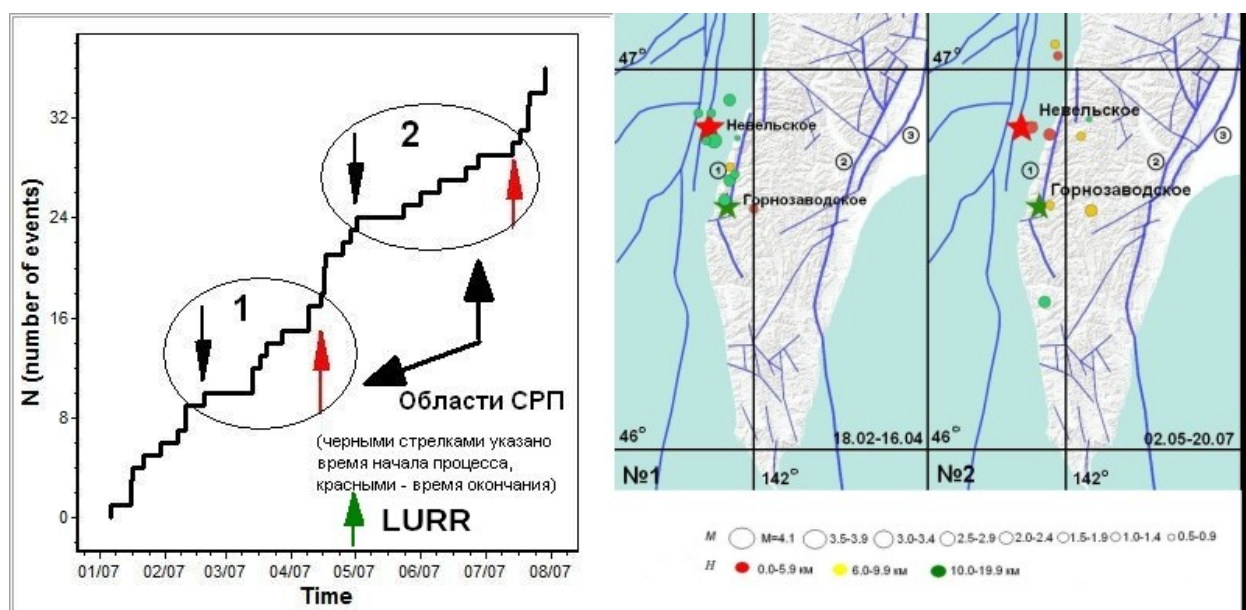


Рисунок 3.15 - Слева - активность в зоне 46.7N, 142.0E ($R=40$ км) с указанием (цифрами) решений СРП, а также начала (черная стрелка) и конца (красная стрелка) расчетной выборки для каждого случая. Справа – эпицентры землетрясений, произошедших в периоды активизаций под номерами 1 (а) и 2 (б)

Примечание: Красная звездочка – эпицентр Невельского землетрясения, зеленая – Горнозаводского. Синие линии – разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Сусунайский [Харахинов, 2010]

Итак, ложным предвестником оказался первый из двух процессов (после него не было землетрясения), и это хорошо – ведь до отбраковки афтершоков таковых (ложных предвестников СРП) было шесть. В приведенном случае возникает тривиальный вопрос – есть ли различие между первой активизацией (ложным предвестником) и второй, сразу после которой и произошло Невельское землетрясение. И если да, то как эти различия можно применять для отсека ложных тревог в реальном прогнозе. Расчет показал, что параметр α в первом случае равен 3.19, а во втором 3.71. Это согласуется с работой [Tikhonov, 2012], где были такие же значения, и здесь различий для нас не наблюдается. Первый СРП закончился в конце апреля 2007 г., а второй начался в мае 2007 г., и это совпадает с появлением предвестника по методу LURR. В первой части работы (использовали полный каталог событий) для отсеки ложных СРП был предложен предвестник LURR, в результате чего из семи активизаций остались только две.

В данном случае (с проведением декластеризации) у нас два СРП на весь рассматриваемый период, а после предвестника LURR всего один. Мы пришли к выводу, что для данного примера (Невельского ЗЛТ) декластеризация существенно улучшает результат. Она минимизирует неопределенность при анализе саморазвивающихся процессов, этот результат совпадает с результатом [Tikhonov, 2012]. Однако мы также хорошо понимаем и другую сторону данного вопроса – этот случай был весьма удобен для отработки алгоритма декластеризации, так как времени от основного толчка (Горнозаводское ЗЛТ) прошло немного и больших ошибок алгоритм не допустил. Если же, например, последнее сильное ЗЛТ произошло в области через 5 и более лет после основного ЗЛТ, различные алгоритмы декластеризации могут давать поразительно различные результаты, и тем самым будут усугубляться ошибки в оценках СРП. В таких неоднозначных случаях очистку каталога от афтершоков лучше не проводить и ограничиться данными по вариациям LURR в рассматриваемой области. Параметр LURR, эффективность которого для Сахалина может считаться убедительной [Развитие методов..., 2018], рекомендуется использовать как временной порог для выявления активизаций СРП, могущих стать форшоковыми (предвестниками сильного землетрясения).

Выводы по главе 3

Расчеты по методу LURR проведены для всей территории Сахалина в период с 1988 по 2018 гг. Рассмотрены вариации параметра LURR превышающие фоновый уровень и характеризующие нелинейный отклик сейсмичности на изменение напряжений в очаговых областях. Определены связи периодов аномальных значений параметра с появлением сильных землетрясений с магнитудой выше 5.5. Рассчитаны основные количественные характеристики установленной связи (пространственная и временная) которые позволяют рассматривать изменения LURR, как предвестник землетрясений. Области аномальных значений параметра с линейными размерами до 200 км во всех случаях включали в себя эпицентры сейсмических событий с магнитудами не менее 5.5, которые происходили в период от 1 до 2 лет после появления аномалий. При работе с методом СРП предложен новый подход для объективной оценки результатов моделирования, а также предложен набор условий для проведения независимых от субъективных оценок расчетов. Для Невельского землетрясения 2007 года метод СРП применен в режиме сканирования с

расчетами в перекрывающихся 28 областях размером 40 км для полного каталога землетрясений и слабых землетрясений ($M < 3.0$). Во всех 28 областях были определены периоды сейсмической активизации (определенные как СРП) предшествующие главному событию, однако задержки с момента их определения до землетрясения 2007 года варьировались от 5 до 107 дней. Выявлено, что за три месяца до землетрясения в Невельске в краевых зонах (удаленных от эпицентра) уже были зафиксированы СРП, при этом они были там единственные. В зонах – близких к будущему эпицентру количество ложных тревог на периоде в восемь месяцев достигало семи, однако время ожидания перед последним СРП сокращалось до нескольких дней.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ LURR И СРП ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА О. САХАЛИН

Результат, представленный в данной главе опубликован в работе [Закупин и др., 2020]. Для анализа были выбраны землетрясения на о. Сахалин с магнитудой $M > 5.5$ в период с 2004 по 2018 гг. Фактически это пять землетрясений (таблица 4.1), расчеты по которым, в том числе, представлены в третьей главе, но для которых имеются каталоги с достаточной представительностью, чтобы использовать в модели СРП. Двухэтапный алгоритм состоял из выявления аномалий во временных распределениях LURR, выбора расчетной области для моделирования СРП в зоне аномальных значений и расчет СРП после появления среднесрочного прогностического признака. Учитывая, что в активных сейсмических зонах, например южной части Западно-Сахалинского разлома, где произошло Невельское землетрясение, сейсмический режим периодически переходит в состояние СРП (см. главу 3), то ограничение периода для обработки методом СРП и является основной задачей для метода LURR. К сожалению, из-за отсутствия до 2004 года каталога нужной представительности для моделирования СРП известное на Сахалине Нефтегорское (1995, $M_w=7.2$) землетрясение не рассматривалось в данной работе, хотя методом LURR для него был получен среднесрочный ретроспективный прогноз. По этой же причине не рассматривалось Углегорское землетрясение 2000 года, но по нему не было и аномалии в методе LURR.

Отметим, что во всех случаях расчет LURR производился для периодов с большой предысторией (от 3 до 8 лет, в зависимости от длины каталога для конкретного события), для демонстрации отсутствия иных аномалий. Однако, одно из пяти событий (Горнозаводское) не было привлечено к расчету, так как ранее расчеты LURR не выявили перед данным событием аномалий, что соответствует «пропуску цели». Это землетрясение было заменено, на одно из более слабых за данный период, но которое было успешно изучено методом LURR – Крильонское (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Объекты исследований – сильные землетрясения за период с 2004 по 2018 гг.

Землетрясение	Дата ЗЛТ	Время возникновения ЗЛТ	Координаты (LAT N, LON E)	Магнитуда
Пильтунское	12.06.2005 г.	04-17-08.1	52.86N 144.18E	Mw=5.6
Невельское	02.08.2007 г.	02-37-39.5	47.30N 141.80E	Mw=6.2
Уангское	16.03.2010. г.	09-44-12.7	52.30N 142.30E	Mw=5.7
Онорское	14.08.2016 г.	01-15-13.9	50.32N 142.49E	Mw=5.8
Горнозаводское	17.08.2006 г.	15-20-34.3	46.60N 141.90E	Mw=5.6
Крильонское	23.04.2017 г.	06-37-06.0	46.07N 142.08E	Mw=5.0

Во всех случаях параметры обработки потока сейсмических событий по методике LURR оставались неизменными: окно – 360 дней, шаг – 30 дней, землетрясения в диапазоне магнитуд от 3.3 до 5.0. Выбор параметров был основан на работах [Yin, 1995; Development..., 2001] и нашей первой работе, в которой алгоритм тестировался [Закупин, 2016]. В работах [Закупин, 2016; 2017] описан подход по выбору расчетных областей для методики LURR. Первоначальные размеры расчетных областей для вычисления параметра не превышают 200 км [Yin, 1995], а геометрической фигурой является окружность. Последовательное перемещение окружности по исследуемой территории (с перекрытием не менее 50%) дает положение области, где значение отклонения параметра от единицы (аномалия) наибольшее. При этом использовать расчетную область для Сахалина меньше 200 км (радиус около 1 градуса) можно лишь на юге, где активность выше, чем на севере. Это ограничение математической обработки, поэтому для единого подхода все расчеты проведены с окружностями радиусом в 1 градус, удовлетворяющими для всего Сахалина.

В работе используются каталоги, составленные по данным локальной сети автоматизированных цифровых сейсмических станций Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук с $M \geq 1.5$ для Крильонского и Невельского землетрясений и каталоги по данным станций сети СФ ФИЦ ЕГС РАН с $M \geq 2.8$ для расчетных областей Уангского, Пильтунского и Онорского землетрясений. Расчетные области для метода СРП соответствовали зонам, где были отмечены аномалии LURR, и, составляли около 70 км в радиусе. Ниже представлены результаты расчетов.

Онорское землетрясение ($M_w=5.8$, 14.08.2016 г.). Это первое землетрясение на Сахалине, которое ожидалось в связи с прогнозом по методу LURR. Первый расчет в данной области был проведен в 2015 году, а к 2016 году оценка места будущего события

была значительно улучшена [Развитие методов..., 2018]. В соответствии с расчетом механизма подвижка в очаге землетрясения 14 августа 2016 г. произошла под действием северо-восток – юго-западных напряжений сжатия, тип сейсмодислокации – взброс со сдвиговой компонентой. Одна из возможных плоскостей разрыва ориентирована на север и падает на восток, другая имеет юго-восточное простирание и более круто падает на юго-запад. Результат расчета по методу LURR показан на рисунке 4.1

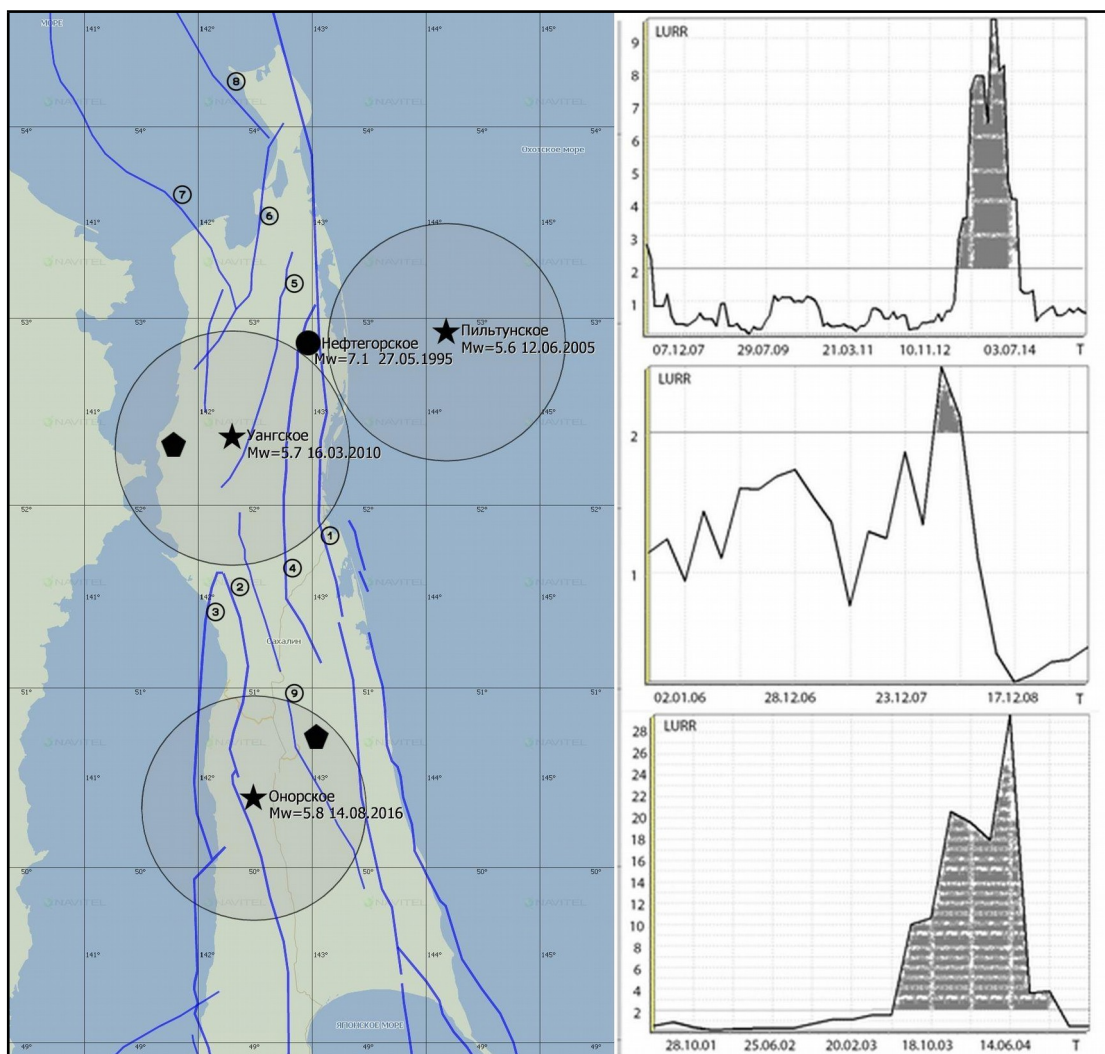


Рисунок 4.1 - Слева – карта расчетных областей для Онорского, Уангского и Пильтунского землетрясений, Справа – временные зависимости LURR (сверху – вниз: Онорское, Уангское, Пильтунское). Параметры расчета: диапазон магнитуд для событий в обработке – $M=3.3-5.0$, ширина окна – 360 дней, сдвиг – 60 дней.

Примечание: звезда – ожидаемое событие, пятиугольник – предыдущее событие в расчетной области с $M_w>5$, круг – значимые землетрясения, оказавшие влияние на сейсмический режим в расчетных областях, закрашенные участки соответствуют

областям аномальных значений выше 2. Указаны разломы [Харахинов и др., 1984]: 1 - Хоккайдо-Сахалинский, 2 - Центрально-Сахалинский, 3 - Западно-Сахалинский, 4 - Верхне-Пильтунский, 5 - Гыргыланьинский, 6 - Восточно-Байкальский, 7 - Западно-Байкальский, 8 - Западно-Шмидтовский, 9 - Срединно-Сахалинский [Харахинов, 2010]

Аномальные значения LURR (в два или более раз превышающие 1) в данной области отмечены в июле 2014 года (за два года до землетрясения). Последнее сильное землетрясение в этой зоне, которое вызвало сильную активизацию и характерное затухание сейсмической активности с многочисленными афтершоками ($M_w=5.0$, обозначено на рисунке 4.1 пятиугольником) произошло 12.12.2011 г. и это приблизительно за 5 лет до следующего – Онорского события. С этого момента имеет смысл провести анализ методом СРП. Выборка (12.12.2011-14.08.2016 гг.) для расчета включила в себя 47 землетрясений. До появления аномалии в LURR и после активизации 12.12.2011 г. наблюдается общий тренд релаксационного типа (затухание сейсмической активности, ускорение отрицательно) (рисунок 4.2а), однако с 2013 года сейсмическая активности стабилизируется (нулевое ускорение). Переход от стабильного тренда к ускорению произошел 22.03.2015 г., а решение получено 22.06.2015 г., причем начальную точку выборки можно смещать от начала 2013 года до середины 2014 года и решение всё равно сохраняется. Решение на рисунке 4.2б получено на выборке с 07.2014 до 06.2015 гг. С середины 2015 года вплоть до августа 2016 года формируется ещё один режим с ускорением (рисунок 4.2а), однако для получения решения не хватает данных (точек кривой). Таким образом для Онорского землетрясения после аномалии LURR получено единственное за рассмотренный период решение по СРП (решение получено в период с середины 2014 по май 2015 гг., рисунок 4.2б). СРП сформировался спустя год после появления аномалии с большой задержкой до прогнозируемого события (492 дня).

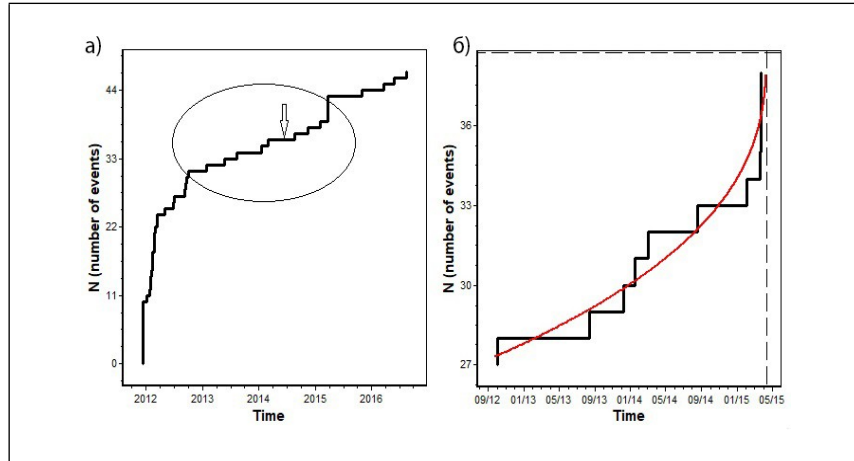


Рисунок 4.2 - Расчетные кривые по методу СРП для Онорского землетрясения 14.08.2016 г.: а) общая картина развития сейсмического процесса с предысторией (стрелкой указано время появления аномалии LURR, отмечена область возникновения признака СРП); б) решение по СРП для выделенной области

Уангское землетрясение ($M_w=5.7$, 16.03.2010 г.). Аномалия LURR (рисунок 4.3) была выделена 21.10.2008 г. (за 17 месяцев до землетрясения) ретроспективно и этот результат был опубликован в работе [Закупин, 2016]. Землетрясение произошло в северо-западной части о. Сахалин в верховьях рек Уанга и Погиби. Подвижка в очаге землетрясения 16 марта 2010 г., имела взбросо-сдвиговый тип и произошла в условиях субширотного сжатия. За историю инструментальных сейсмологических наблюдений в окрестностях этой зоны произошло сильное землетрясение с магнитудой $M=5.0$ (1962 г.) с последующими повторными толчками с $M \geq 4.0$. Другой подземный толчок с магнитудой $M=4.8$ был зарегистрирован 14 марта 1980 г. [Коновалов и др., 2012]. Выборка (08.03.2005-16.03.2010 гг.) для расчета включила в себя 45 землетрясений. Здесь (рисунок 4.3а), как и в соседней очаговой зоне Онорского землетрясения, прослеживается 5 летний период, предыдущее землетрясение также почти на 15% слабее по магнитуде ($M=5.1$, обозначено на рисунке 4.1 пятиугольником), однако имеет характерный афтершоковый тренд релаксации напряжений в очаге. Уже через год после события 08.03.2005 г. релаксационный процесс сменился на стабильный. В сентябре 2009 года начался быстрый рост (рисунок 4.3а), что можно увидеть из графика, а решение для СРП появляется 24 февраля 2010 года (с расчетным периодом с 2006 по 2010 гг., рисунок 4.3б).

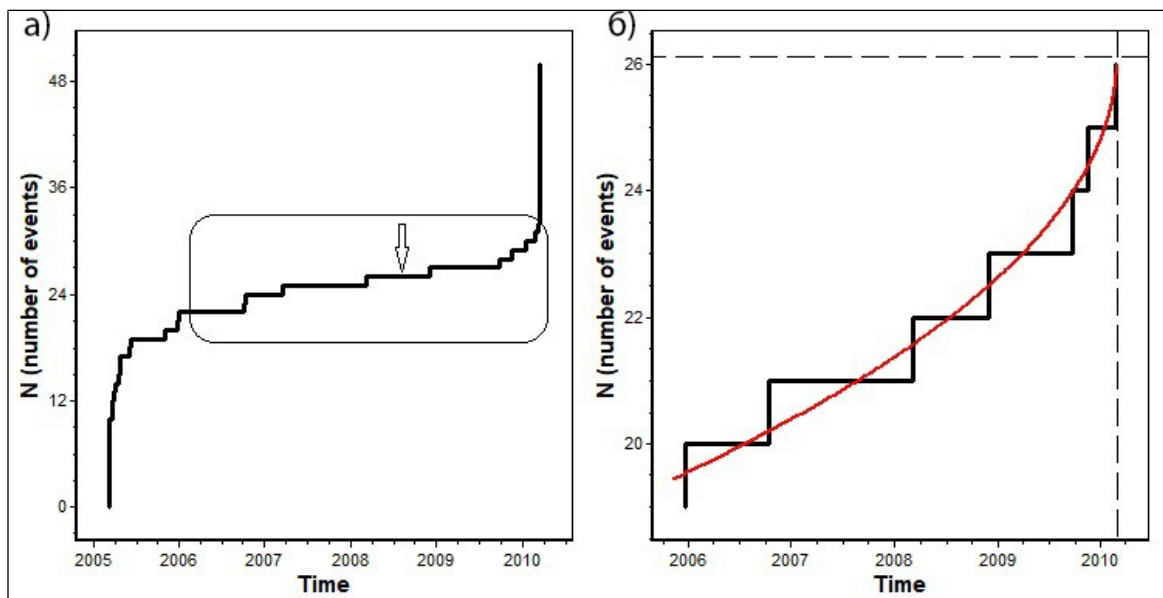


Рисунок 4.3 - Расчетные кривые по методу СРП для Уангского землетрясения 16.03.2010 г.: а) общая картина развития сейсмического процесса с предысторией (стрелкой указано время появления аномалии LURR, отмечена также область возникновения признака СРП); б) решение по СРП для выделенной области

Пильтунское землетрясение ($M_w=5.6$, 12.06.2005 г.). Исследование данного события методом LURR подробно описано в работе [Закупин, 2017], где показано, что аномальные значения были зафиксированы в марте 2004 г. Результат показан на рисунке 4.1. Рассматриваемое землетрясение 12 июня 2005 г. $M_w=5.6$ произошло у внешнего края восточного шельфа Северного Сахалина. Сейсмичность Восточно-Сахалинской системы разломов представлена сильнейшими землетрясениями: на границе впадины Дерюгина (1944 г. $M=5.5$) и Охинско-Пильтунскими землетрясениями 1932, 1939, 1942 и 1953 гг. ($M=5.0-5.5$) [Оскорбин, 1997]. Выборка (25.06.2000-01.06.2005 гг.) для расчета включила в себя 63 землетрясения. В расчетной зоне, показанной овалом на рис.5а, решения СРП возникают на периодах с октября-ноября 2004 по июнь 2005 гг. С февраля по июнь 2005 года решений для СРП уже нет. Отметим, что в этой зоне (рисунке 4.4а), в непосредственной близости от эпицентра Нефтегорского землетрясения, это уже 4 активизация с 2001 года. С момента аномалии в LURR получено решение 01.06.2005 г. (рисунке 4.4б).

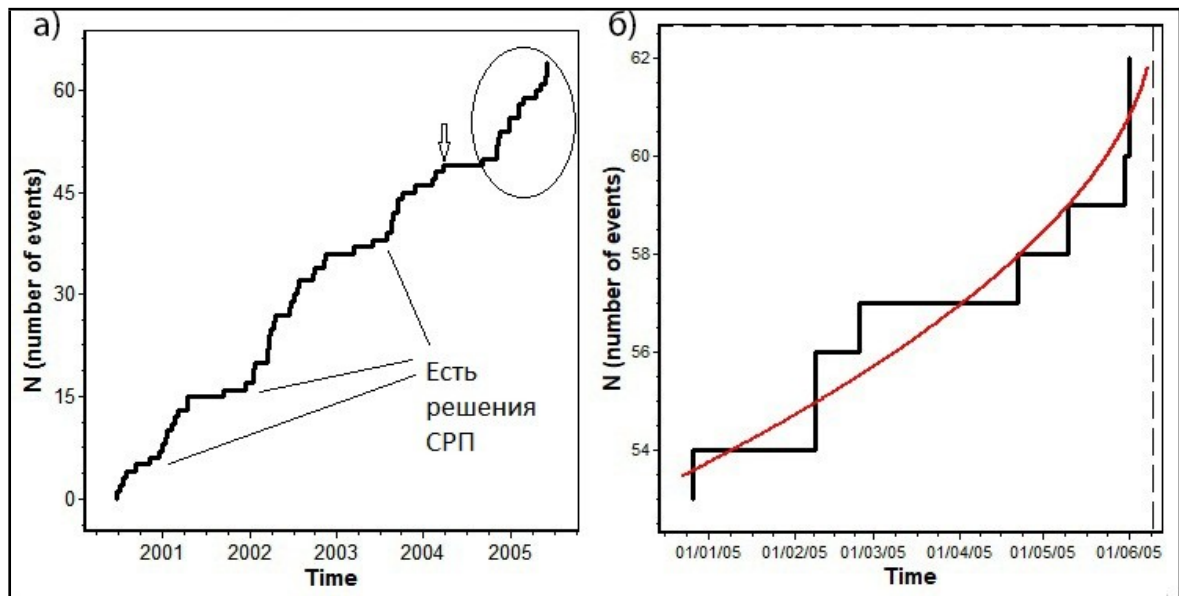


Рисунок 4.4 - Расчетные кривые по методу СРП для Пильтунского землетрясения 12.06.2005 г.: а) общая картина развития сейсмического процесса с предысторией (стрелкой указано время появления аномалии LURR, отмечена область возникновения признака СРП); б) решение по СРП для выделенной области

Крильонское землетрясение ($M_w=5.0$, 23.04.2017 г.). В расчетной зоне (рисунок 4.5) аномальные значения LURR в апреле-мае 2015 года в десятки раз превышали фоновый уровень. Выборка (20.10.2003-12.04.2017 гг.) для расчета СРП включила в себя 228 землетрясений. Релаксационный процесс в зоне Горнозаводского землетрясения (эта область входит в расчетную зону для Крильонского землетрясения) перешел в стабильный режим в 2008 году (рисунок 4.6). В конце 2012 года сейсмическая активность в зоне резко ускоряется, и, несмотря на то, что это явный признак землетрясения 25 ноября 2013 года ($M=5.0$), мы не будем останавливаться на этом, а рассмотрим тренд далее. Отметим, что по данному событию некоторые результаты опубликованы в [Закупин, 2018]. Релаксация после активизации 2012-2013 гг. закончилась к марту-апрелю 2014 года (рис. 2d). После аномалии LURR два СРП отмечены в начале 2016 года и в августе 2016 года. Решение (на момент 05.02.2017 г.) по последнему СРП показано на рисунке 4.6. Первая активизация таким образом признается ложной, отслеживается вторая.

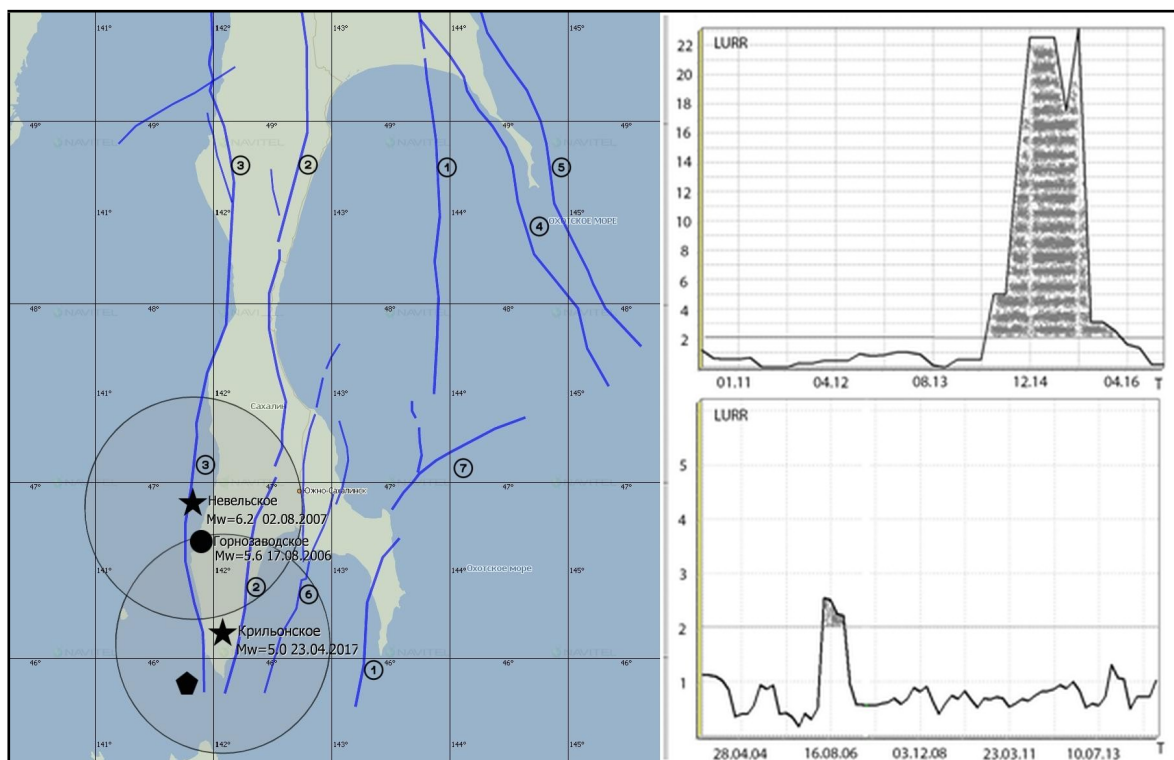


Рисунок 4.5 - Слева – карта расчетных областей для Крильонского и Невельского землетрясений, справа – временные зависимости LURR (сверху – вниз: Крильонское, Невельское). Параметры расчета: диапазон магнитуд для событий в обработке – $M=3.3-5$, ширина окна – 360 дней, сдвиг – 60 дней.

Примечание: звезда – ожидаемое событие, пятиугольник – предыдущее событие в расчетной области с $M_w > 5$, круг – значимые землетрясения, оказавшие влияние на сейсмический режим в расчетных областях, закрашенные участки соответствуют областям аномальных значений выше 2. Указаны разломы [Харахинов и др., 1984]: 1 - Хоккайдо-Сахалинский, 2 - Центрально-Сахалинский, 3 - Западно-Сахалинский, 4 - Верхне-Пильтунский, 5 – Гыргыляньинский, 6 - Восточно-Байкальский, 7 - Западно-Байкальский, 8 - Западно-Шмидтовский, 9 – Срединно-Сахалинский [Харахинов, 2010]

останавливаться на этом, а рассмотрим тренд далее. Отметим, что по данному событию некоторые результаты опубликованы в [Закупин, 2018].

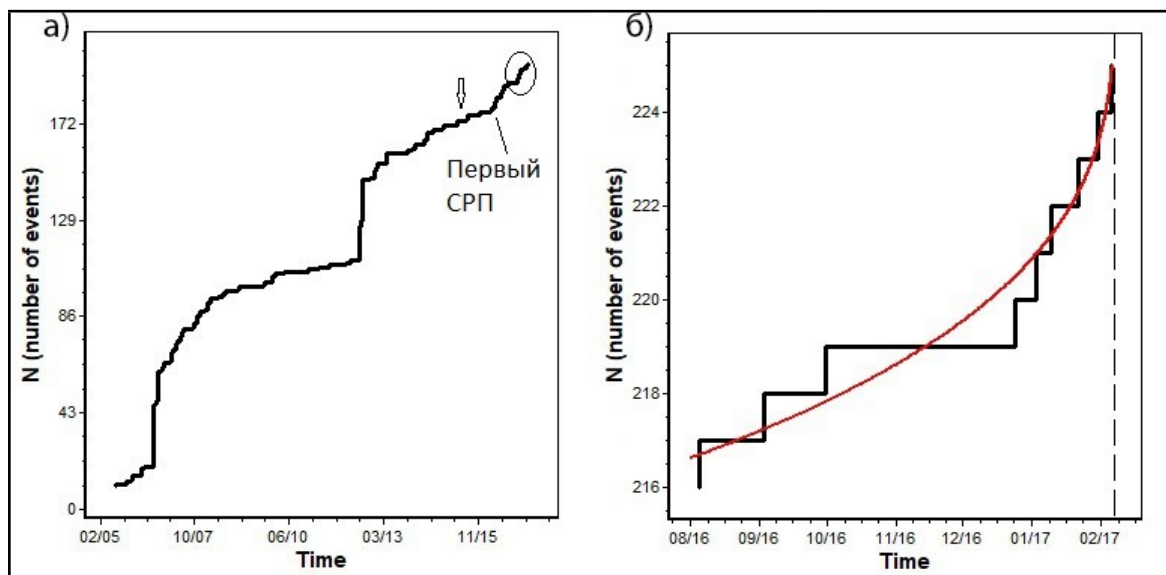


Рисунок 4.6 - Расчетные кривые по методу СРП для Крильонского землетрясения 23.04.2017 г.: а) общая картина развития сейсмического процесса с предысторией (стрелкой указано время появления аномалии LURR, отмечена область возникновения признака СРП); б) решение по СРП для выделенной области

Невельское землетрясение ($M_w=6.2$, 02.08.2007 г.). Первая точка аномалии датирована 17.06.2006, то есть почти за год до Невельского землетрясения (рисунок 4.5). Близкие по расположению и времени Невельское и Горнозаводское ($M_w=5.6$) землетрясения могут быть разделены. В [Закупин, 2016] это сделано при использовании меньшей величины скользящего окна (30 дней вместо 360). Несмотря на появление многочисленных случайных выбросов, этот подход работает в качестве вспомогательного инструмента. Так в [Закупин, 2016] показано, что аномалия произошла в мае 2007 года. Результаты по методу СРП показаны на рисунке 4.7.

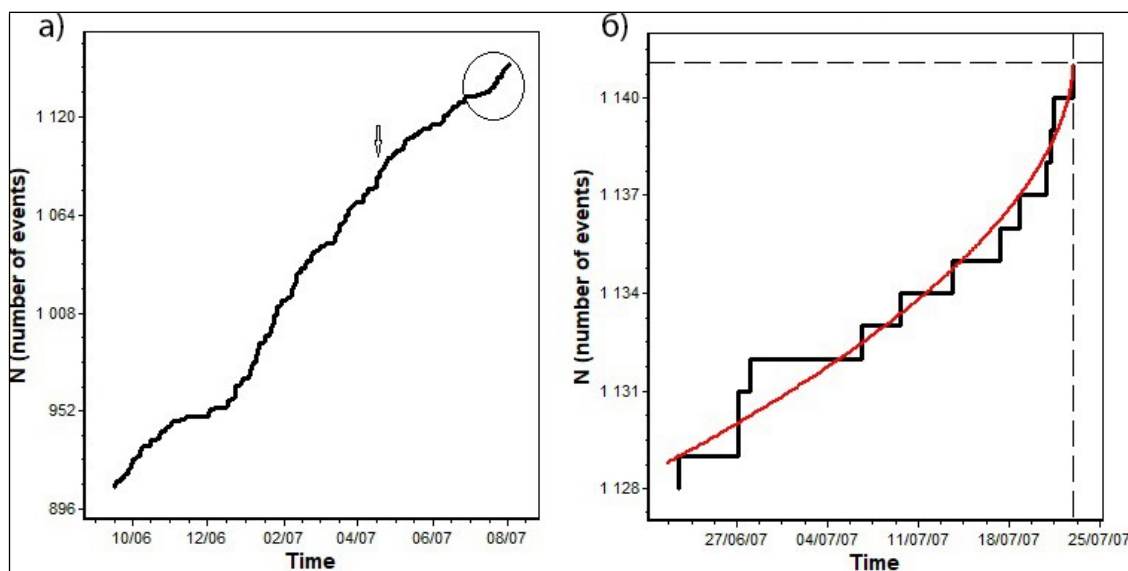


Рисунок 4.7 - Расчетные кривые по методу СРП для Невельского землетрясения 02.08.2007 г.: а) общая картина развития сейсмического процесса с предысторией (стрелкой указано время появления аномалии LURR, отмечена область возникновения признака область СРП); б) решение по СРП для выделенной области

Выборка (16.09.2006-02.08.2007 гг.) для расчета включила в себя 243 землетрясения. В данной зоне после Горнозаводского землетрясения 17.08.2006 г. ($M_w=5.6$) выявлено два релаксационных процесса (рисунок 4.7а), причем в конце 2006 года наблюдался СРП, который потом впрочем без последствий перешел в стадию релаксации (рисунок 4.7а). К маю 2007 года режим стабилизировался. Определено решение для СРП (рисунок 4.7б) по выборке с 22.06.2007 по 22.07.2007 гг.

Для систематизации полученного результата можно предложить сравнить следующие характеристики для описания переходных процессов от аномалий LURR до выхода в режим с ускорением в СРП (таблица 4.2). Во-первых, это время появления аномалии LURR t_1 (в таблице привязка к максимальному значению). Во-вторых, это возможная неопределенность в интерпретации, то есть количество режимов с ускорением после LURR и до сильного землетрясения. Так как расчеты показали, что оценки точного времени по положению вертикальной асимптоты практически во всех случаях неинформативны (не соответствуют заявленной в методе точности и часто плывут по мере накопления событий после уже имеющегося решения), то необходимо брать в расчет не полученные решения, а наличие решения как такового. Этот вариант естественным образом переводит оценки по методу СРП из разряда краткосрочных в среднесрочные оценки (месяцы-дни). Поэтому в таблице приводится наличие возможного решения СРП

по первой дате его определения t_2 (дата последней точки – землетрясения, после включения в расчет которой была получена аппроксимация). Интервал времени между датой землетрясения и датой t_2 характеризует время ожидания события (или погрешность в оценках прогноза).

Таблица 4.2 - Характеристики прогнозной модели

Землетрясение	t_3 (дата ЗЛТ)	t_1 (время появления аномалии LURR)	Кол-во решений по СРП после t_1	Наличие решения	t_2 (дата последней точки СРП)	$t_3 - t_2$ (в днях)
Онорское	16.08.2016 г.	07.2014 г.	2	да	24.03.2015 г.	492
Уангское	16.03.2010 г.	10.2008 г.	1	да	24.02.2010 г.	20
Пильтунское	12.06.2005 г.	03.2004 г.	1	да	01.06.2005 г.	11
Крильонское	23.04.2017 г.	05.2015 г.	2	да	05.02.2017 г.	77
Невельское	02.08.2007 г.	05.2007 г.	2	да	22.07.2007 г.	11

В работе показано, что после появления аномалии LURR период тревоги в несколько лет можно уменьшить, так как сильные землетрясения в итоге происходили по завершению одного из последующих СРП (которых было не больше двух). Так, в случае с Пильтунским событием это была четвертая активизация, а первые три автоматически были отбракованы. Рассмотренные случаи показали, что не всегда после появления аномалии LURR можно уйти от ложных тревог – «лишних» СРП. Так, в случае Онорского землетрясения в 2015 году после СРП не произошло сильное событие (рисунок 4.1а), а затем тут же последовало формирования нового СРП, однако для его оценки (математического расчета в программе) уже не хватило времени (точек). Из-за этого корректировку времени ожидания произвели по первому СРП, что в итоге незначительно улучшило оценки среднесрочного прогноза LURR. Таким образом прогноз Онорского землетрясения методом СРП дал «ложную тревогу». Почти аналогичная ситуация и в случае с Крильонским событием, по которому СРП был отмечен в 2015-2016 гг., но затем появляется новая активизация с августа 2016 г. Разница в том, что новая активизация в данном случае позволила получить новое решение, а в случае с Онорским событием нет. В целом видно (таблица 4.2), что метод СРП значительно улучшил прогнозные оценки LURR в трех случаях из пяти: Пильтунского, Невельского и Уангского землетрясений. Фактически период тревоги можно объявлять не после аномалии, а по факту наличия после него решения СРП. Для Невельского землетрясения этот результат хорошо известен [Тихонов, 2009]. Имеет принципиальное значение, что метод СРП оказался применим и для других сейсмогенерирующих зон (случаи Уангского и Пильтунского землетрясений),

удаленных более чем на 500 км от гипоцентра Невельского события. Полученные данные свидетельствуют о корректности оценок LURR для выявления перехода очаговой области в состояние подготовки сильного землетрясения (среднесрочный прогноз). Этот переход может быть ассоциирован с началом режима нелинейного деформирования [Yin, 1995], который неизбежно сопровождается снижением сейсмической активности и стабилизацией скорости накопления событий, а также последующим переходом в режим ускоренного роста (СПП). При этом средние сроки ожидания, которыми оперируют в методе LURR, не позволяют режиму активизации реализоваться более двух раз, что имеет принципиальное значение для реагирования на информацию о прогнозе – ложная тревога может быть или одна или отсутствовать вовсе (таблица 4.2).

Интересно оценить эффективности метода с позиций подхода, использованного в работе [Гусев, 1974]. Если по конкретному методу прогноз выдается для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона, то эффективность J можно определить по следующей формуле:

$$J = N_+ \cdot T / (N \cdot T_{alarm}) \quad (4.1)$$

где N_+ - количество «ожидаемых» землетрясений, то есть соответствующих успешному прогнозу, N – общее количество произошедших землетрясений с параметрами (местоположение – энергия), соответствующими прогнозу, то есть землетрясений, которые могли бы предсказываться, T_{alarm} – общее время тревоги, то есть суммарная длительность всех прогнозов, T – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу. В этом случае знаменатель дроби отражает среднее число возникновения землетрясений за время T_{alarm} в случае отсутствия связи прогнозов с землетрясениями. Соответственно, эффективность J показывает, во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число попавших в тревожное время случайным образом. Очевидно, что при случайном угадывании эффективность J равна 1. Так вот, в нашем случае, при общем количестве землетрясений на Сахалине с магнитудами $M > 5.5$ $N=8$, успешных прогнозов было 6 (N_+). Общий период наблюдения составил 264 месяца (1995-2017 гг.), а время тревоги суммировалось по 6 случаям и составило 87 месяцев. В итоге показатель J оказался равен 2,28. В целом весьма впечатляющий результат, который значительно превышает показатели по краткосрочным методам (в основном на базе вариаций различных геофизических полей) более чем в два раза [Чебров и др., 2013].

Можно попытаться объединить вышеизложенные результаты с ранее сделанными прогнозами И.Н. Тихонова [Tikhonov, 2012]. Для Сахалина и Курильского региона в

период после Шикотанского землетрясения 1995 г. выдано 8-9 среднесрочных прогнозов, которые реализовались полностью или частично (с отклонениями в параметрах прогноза). В этот период сейсмичность Сахалина может считаться более чем умеренной (отсутствие землетрясений с магнитудой $M > 7.0$). Имеющаяся сейсмическая сеть Сахалина оказалась достаточной для контроля процесса подготовки очагов землетрясений с магнитудами $5.0 \leq M \leq 6.0$, что позволило провести расчеты по методам LURR и СРП. Прогнозы, получаемые этими методами, можно ввести в научный оборот и рассматривать наряду с другими отработанными методами [Сидорин, 1992; Соболев, 1993; Зубков, 2002; Завьялов, 2006].

Для сравнения полученных результатов с результатами работ по другим регионам важно отметить примеры сейсмических прогнозов на Камчатке [Успешный прогноз..., 2017], а ранее в Китае [Studies and experiments..., 2003; Мельников, 2014], и, таким образом, Сахалинские прогнозы – не являются исключительным случаем. Вместе с тем, пока еще невелико число прогнозов, которые оправдались.

Можно предположить, что особенности геологического строения и современного напряженного состояния коры Сахалина способствуют более регулярному протеканию деформационного процесса, и это «облегчает» задачи прогноза. Поясним предположение. Разломы разного ранга образуют густую сеть на территории о. Сахалин [Оскорбин, 1997; Харахинов и др., 1984; Воейкова и др., 2007; Харахинов, 2010]. В эпицентральных зонах рассмотренных землетрясений (таблица 4.1) размеры нерасчлененных блоков не превышают 10 - 50 км, т.е. значительно меньше размеров тектонических плит - Охотской, Тихоокеанской и др. А напряженное состояние верхнего слоя коры [Ребецкий, 2014] характеризуется преобладанием субширотного сжатия. Обстановка может оказаться сходной с моделью скольжения блоков по разлому, на основе которой в недавних работах [Кочарян, 2018; О перспективе обнаружения..., 2018] предложен новый подход к прогнозам землетрясений. Появление форшоков связано как раз с событиями медленного скольжения на границе блоков [Кочарян, 2016; Jones, 1976; The long precursory..., 2013]. А метод СРП основан именно на форшоковой активности.

Выводы по главе 4

Показано, что совместное применение методов LURR и СРП, каждый из которых был ранее адаптирован для каталогов землетрясений Сахалина, позволяет улучшить точность определения времени ожидаемого события (от нескольких лет по данным LURR

до месяцев-дней по данным СРП при существенном снижении количества ложных тревог свойственных СРП). На основе этих методов предложена последовательность оценки сейсмической опасности на о. Сахалин благодаря уточнению времени переходов между различными режимами сейсмического процесса: от фонового к подготовке очага (стадии LURR – предвестника) и от режима сравнительно «медленной» подготовки режиму с обострением (СРП). Подтверждено что параметр LURR, а именно его уменьшение после максимального значения, указывает на переход в стадию временного снижения сейсмической активности (вероятно, ввиду кластеризации разрывов) с последующим переходом к нарастанию активности - началу СРП. Прогнозные оценки по методу СРП оказались эффективными, когда предварительно имелся прогноз на основе данных изменения параметра LURR. Это проявилось, в достаточной степени, на примерах Сахалинских землетрясений с магнитудами $M > 5.5$ в период с 2004 по 2018 гг., когда сейсмическая сеть на Сахалине обеспечивала регистрацию достаточно большого числа слабых событий (с магнитудами до 3.5). Действительно, расчеты по методу СРП для пяти самых сильных землетрясений на острове Сахалин за последние тринадцать лет в областях аномальных значений LURR выявили нарастающие решения модели. Эти решения получены за 11-77 дней до главных событий. Предложенная схема последовательного применения методов LURR и СРП демонстрирует перспективность (по крайней мере, для Сахалина) и её дальнейшее применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы исследования сейсмического режима LURR и СРП теоретически обоснованы для их последовательного применения в подходе к оценке сейсмической опасности на о. Сахалин.

Подтверждено, что снижение параметра LURR после своего максимального показателя, свидетельствует о переходе геосреды в состояние неустойчивости, в котором любой режим с ускорением, определяемый как саморазвивающийся процесс, может быть иницирующим для главного события.

Впервые предложена последовательность оценки сейсмической опасности на Сахалине благодаря уточнению времени переходов между различными режимами сейсмического процесса: от фонового к подготовке очага (стадии LURR - предвестника) и от режима сравнительно «медленной» подготовки режиму с ускорением (СРП).

Совместное применение методов LURR и СРП позволяет улучшить точность определения времени ожидаемого события (от нескольких лет по данным LURR до месяцев-дней по данным СРП при существенном снижении количества ложных тревог свойственных СРП). После появления предвестника LURR в течение 1-2 лет сейсмический процесс переходит в режим с ускорением (определяемый как саморазвивающийся процесс, реализующийся от недели до 2.5 месяцев до сильного землетрясения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 2016611230. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Seis-ASZ» / А.С.Закупин. – оформ. 28.01.2016.
2. Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке / Г.И. Дружин, Ю.В. Марапулец, Н.В. Чернева и др., // ДАН. – 2017. – Т. 472, № 5. – С. 584-589.
3. Богинская, Н.В. Методы повышения эффективности техники сейсмического прогноза LURR (LOAD-UNLOAD RESPONSE RATIO) / Н.В. Богинская, А.С. Закупин // XVII Международная конференция по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ, 15-17 июня 2017 г., г. Южно-Сахалинск. Материалы конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2017. – С. 402-407.
4. Воейкова, О.А. Неотектоника и активные разрывы Сахалина / О.А. Воейкова, С.А. Несмеянов, Л.И. Серебрякова. – М.: Наука, 2007. - 186 с.
5. Геологическая карта Дальнего Востока СССР. Масштаб 1:1500000. С.: ВСЕГЕИ, 1992. – 8 л. – Объяснительная записка. – 100 с.
6. Геологическое строение Северо-Сахалинской нефтегазоносной области по данным комплексных геофизических исследований / В.Д. Кононов, И.М. Альперович, Ю.Г. Слуднев и др. М.: ВИЭМС, 1979. – 42 с.
7. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования / П.А. Каменев, Д.В. Костылев, Н.В. Богинская, А.С. Закупин // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 390-402.
8. Гусев, А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / А.А. Гусев. – Н.: Наука, 1974. – С. 109-119.
9. Дядьков, П.Г. Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая / П.Г. Дядьков, Ю.М. Кузнецова // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 19-25.
10. Заблаговременный среднесрочный прогноз Южно-Курильских землетрясений 4 октября 1994 года и 3 декабря 1995 года / В.Г. Кособоков, Дж. Х. Хили, Дж. У. Дьюи и др. // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. – М.: Наука, 1996. – С. 46-55.

11. Завьялов, А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация / А.Д. Завьялов. – М.: Наука, 2006. – 254 с.
12. Закупин, А.С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса. / А.С. Закупин // Геоинформатика. – 2016. – № 1. – С. 34-43.
13. Закупин, А.С. Приливные деформационные возмущения как инструмент для прогноза сейсмической опасности (на примере Южного Сахалина) / А.С. Закупин, И.Н. Тихонов, Р.З. Тараканов // Мониторинг. Наука и технологии. – 2016 – Т. 26, № 1. – С. 25-30.
14. Закупин, А.С. Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для северного Сахалина / А.С. Закупин, О.А. Жердева // Вестник ДВО РАН. – 2017. – № 1. – С. 18-25.
15. Закупин, А.С. О возможности пространственно-временной локализации повышенной сейсмической опасности в методике среднесрочного прогноза LURR (на примере Новой Зеландии) / А.С. Закупин, П.А. Каменев // Геосистемы переходных зон. – 2017. – № 3. – С. 40-49.
16. Закупин, А.С. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ($M_w > 5$) на Сахалине методом LURR / А.С. Закупин, Е.П. Семенова // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2018. – № 5. – С. 73-88.
17. Закупин, А.С. Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? / А.С. Закупин, Н.В. Богинская // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 27-34.
18. Закупин, А.С. Методические аспекты исследования форшоковых последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине / А.С. Закупин, Н.В. Богинская, М.Ю. Андреева // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 377-389.
19. Закупин, А.С. Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR И СРП для прогноза землетрясений на Сахалине / А.С. Закупин, Л.М. Богомоллов, Н.В. Богинская // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19, № 1. – С. 66-78.
20. Зубков, С.И. Предвестники землетрясений / С.И. Зубков. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 139 с.
21. Изучение сейсмического режима на острове Матуа в составе комплексной экспедиции 2017 года / А.С. Закупин, И.П. Дудченко, Н.В. Богинская, Д.В. Костылев, П.А. Каменев // Вестник ДВО РАН. – 2018. – № 1. – С. 161-167.

22. Каталог землетрясений юга Сахалина за период с 2000 по 2010 г. (по данным автономных цифровых сейсмических станций) / Ч.У. Ким, Е.П. Семенова, О.А. Жердева и др. – В.: Дальнаука, 2011. – 357 с.
23. Кейлис-Борок, В.И. Периоды повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира. Математические методы в сейсмологии и геодинамике / В.И. Кейлис-Борок, В.Г. Кособоков // Вычислительная сейсмология. – 1986. – №19. – С. 48-58.
24. Коновалов, А.В. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 года ($M_w = 5.8$) на северо-западе о. Сахалин / А.В. Коновалов, Е.П. Семенова, Д.А. Сафонов // Вулканология и сейсмология. – 2012. – № 4. – С. 37-49.
25. Коновалова, А.А. Различие в наклоне графика повторяемости независимых землетрясений и афтершоковых последовательностей / А.А. Коновалова, В.А. Салтыков // Вестник Краунц. Науки о Земле. – 2008. – № 1. – С. 74-81.
26. Коновалова, А.А. Мониторинг вариаций наклона графика повторяемости землетрясений: методика и примеры / А.А. Коновалова, В.А. Салтыков // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. трудов II научно-технической конференции, 11–17 октября 2009 г., Петропавловск-Камчатский. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. – С. 235-238.
27. Копылова, Г.Н. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке в 1977-2017 гг.: история и результаты / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина // Подземные воды востока России. Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России: сб. докладов XXII Совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием, 04-20 июня 2018 г., Якутск. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. – С. 265-269.
28. Кособоков, В.Г. Экспериментальный среднесрочный прогноз в реальном времени: проверка алгоритма М8. Математическое моделирование сеймотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений / В.Г. Кособоков, А.В. Хохлов. – М.: МИТП РАН, 1993. – № 1. – С. 53-60.
29. Кособоков, В.Г. Мегаземлетрясения предсказуемы? / В.Г. Кособоков // Геофизические процессы и биосфера. – 2011. – Т. 10, № 2. – С. 5-21.
30. Кочарян, Г.Г. Геомеханика разломов / Г.Г. Кочарян. – М.: ГЕОС, 2016. – 424 с.
31. Кочарян, Г.Г. Лабораторные исследования процесса скольжения по разлому как физическая основа нового подхода к краткосрочному прогнозу землетрясений / Г.Г. Кочарян, И.В. Батухтин // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 671-

- 691.
32. Куилдорф, Г. Вопросы теории оценивания / Г. Куилдорф. – М.: Наука, 1966. – 176 с.
 33. Левин, Б.В. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин / Б.В. Левин, Ч.У. Ким, В.Н. Соловьёв // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, № 5. – С. 93-103.
 34. Левина, В.И. Рой землетрясений на Камчатке с основным событием 21 июня 1996 года ($M_w=6.8$) / В.И. Левина, Е.И. Иванова, А.А. Гусев // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. – М.: ФИЦ ЕГС РАН, 2002. – С. 138-143.
 35. Ломтев, В.Л. Тектонические аспекты коровой сейсмичности Сахалина / В.Л. Ломтев, С.П. Никифоров, Ч.У. Ким // Вестник ДВО РАН. – 2007. – № 4. – С. 64-71.
 36. Лукк, А.А. Надежность определения параметров распределения Гутенберга–Рихтера для слабых землетрясений Гармского района в Таджикистане / А.А. Лукк, Г.А. Попандупуло // Физика Земли. – 2012. – № 9-10. – С. 31-55.
 37. Любушин, А.А. Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. / А.А. Любушин // Наука и технологические разработки. – 2011. – Т. 90, № 1. – С. 3-12.
 38. Макаров, П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред / П.В. Макаров // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 3. – С. 19-35.
 39. Малинецкий, Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: URSS, 2002. – 306 с.
 40. Малышев, А.И. Динамика саморазвивающихся процессов / А.И. Малышев // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 4. – С. 61-72.
 41. Малышев, А.И. Закономерности динамики форшок-афтершоковых последовательностей в районе Южных Курильских островов / А.И. Малышев, И.Н. Тихонов // ДАН СССР. – 1991. – Т. 319, № 1. – С. 134-138.
 42. Малышев, А.И. Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени / А.И. Малышев, И.Н. Тихонов // Физика Земли. – 2007. – № 6. – С. 37-51.
 43. Малышев, А.И. Перспективы практического использования прогнозируемости сейсмического потока / А.И. Малышев // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. трудов VI научно-технической конференции, 1-7 октября 2017 г., Петропавловск-Камчатский. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 59-62.
 44. Малышев, А.И. Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного об-

- рамления Тихого океана по данным каталога USGS / А.И. Малышев, Л.К. Малышева // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 141-153.
45. Малышев, А.И. Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг. / А.И. Малышев // Вулканология и сейсмология. – 2019. – № 1. – С. 52-66.
 46. Марапулец, Ю.В. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений / Ю.В. Марапулец, Б.М. Шевцов, И.А. Ларионов // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31, № 6. – С. 59-67.
 47. Матвиенко, Ю.Д. Применение методики М8 на Камчатке: успешный заблаговременный прогноз землетрясения 5 декабря 1997 г. / Ю.Д. Матвиенко // Вулканология и сейсмология. – 1998. – № 6. – С. 27-36.
 48. Медведева, А.Ю. Цунами в Черном море: исторический обзор и результаты моделирования / А.Ю. Медведева, Е.А. Куликов // Комплексные исследования Мирового океана: сб. трудов IV научной конференции молодых ученых, 22-26 апреля 2019 г., Севастополь. – Севастополь: МГИ РАН. – 2019. – С. 122-123.
 49. Мельников, М.Г. Опыт прогноза землетрясений в сейсмической зоне рифта Шаньси (Китай) и его опережающих разломах на основе волновой концепции с использованием ограниченной базы сейсмических событий / М.Г. Мельников // Вестник ИГТУ. – 2014. – Т. 88, № 5. – С. 66-74.
 50. Моги, К. Закономерности в пространственном и временном распределении сильных землетрясений и предсказание землетрясений / К. Моги // Поиски предвестников землетрясений: сб. докл. Международного симпозиума, 27 мая-3 июня 1974 г., Ташкент. – Ташкент, 1976. – С.19-24.
 51. Моги, К. Предсказание землетрясений / К. Моги. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
 52. Молчан, Г.М. Целевой подход к проблеме идентификации афтершоков / Г.М. Молчан, О.Е. Дмитриева // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – С. 62-69.
 53. Мухамедиев, Ш.А. Где и как зародились разрывы землетрясений 26.12.04 и 28.03.05 у о. Суматра / Ш.А. Мухамедиев, А.Н. Галыбин // ДАН. – 2006. – Т. 406, № 1. – С. 95-98.
 54. Мячкин, В. И. Процессы подготовки землетрясений / В.И. Мячкин. М.: Наука, 1978. – С. 53-68.
 55. Наблюдения слабых землетрясений гидрофонной станцией на мелководье Южных Курильских островов / А.С. Борисов, С.А. Борисов, Б.В. Левин и др. // Геодинамика и

- тектонофизика. – 2012. – Т. 3, № 2. – С. 103-113.
56. Невельское землетрясение 02.08.2007: анализ инструментальных данных / Ч.У. Ким, В.И. Михайлов, С.Р. Сен и др. // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28, № 5. – С. 4-15.
 57. Нейросетевая методика выделения прогностических аномалий по низкочастотным электромагнитным сигналам в Курило-Камчатском регионе / И.А. Попова, А.А. Рожной, М.С. Соловьева и др., // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 162-174.
 58. Николаев, В.А. Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами / В.А. Николаев // Наведенная сейсмичность. М.: Наука. – 1994а. – С. 103-114.
 59. Николаев, В.А. Реакция сильных землетрясений на фазы земных приливов / В.А. Николаев // Физика Земли. – 1994б. – № 11. – С. 49-58.
 60. О перспективе обнаружения процесса подготовки землетрясения в спектре сейсмического шума. Лабораторный эксперимент / Г.Г. Кочарян, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов и др. – Физика Земли. – 2018а. – № 6. – С. 117-128.
 61. Опыт картирования очагов землетрясений / В.И. Уломов, Т.П. Полякова, Л.С. Шумилина и др. // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – С. 99-108.
 62. Оскорбин, Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей / Л.С. Оскорбин, А.О. Бобков // Геодинамика зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 154-178.
 63. Оскорбин, Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина / Л.С. Оскорбин, А.О. Бобков // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Т. VI. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. – 1997. – 240 с.
 64. Особенности переходной зоны между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами (на примере напряженного состояния о-ва Сахалин) / Л.А. Сим, Г.В. Брянцева, П.А. Савичев и др., // Геосистемы переходных зон. – 2017. – № 1. – С. 3-22.
 65. Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки / В. А. Салтыков, Ю. А. Кугаенко, Н. М. Кравченко и др., // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 65-84.
 66. Попандопуло, Г.А. Закономерности временных вариаций сейсмических параметров и

- возможность предсказания сильных землетрясений на территории Греции / Г.А. Попандопуло, Я. Баскутас // Физика Земли. – 2011. – № 11. – С. 27-38.
67. Попандопуло, Г.А. Пространственно-временной анализ представительной магнитуды и наклона графика повторяемости по данным каталога землетрясений Греции / Г. А. Попандопуло, Я. Баскутас, Э. Хатзиоанну // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 45-61.
 68. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов / В.А. Салтыков, Кугаенко Ю.А., Синицин В.И. и др., // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 2. – С. 110-124.
 69. Признаки подготовки сейсмических событий по вариациям естественных геофизических полей над залежью газа / В.А. Паровышний, А.И. Казаков, Д.В. Паровышний и др., // Мониторинг. Наука и технологии. – 2016. – Т. 26, № 1. – С. 25-32.
 70. Проверка алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений: схема теста в реальном времени, результаты ретроспекции / В.Г. Кособоков, Дж. Х. Хили, Дж. У. Дьюи и др. // ДАН. – 1992. – Т. 325, № 1. – С. 46-48.
 71. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине ($M_w=5.8$, 14 августа 2016 года) / А.С. Закупин, Ю.Н. Левин, Н.В. Богинская и др. // Геология и геофизика. – 2018. – № 11. – С. 1904-1911.
 72. Раутиан, Т.Г. Энергия землетрясений / Т.Г. Раутиан // Методы детального изучения сейсмичности. М.: Издательство АН СССР. – 1960. – № 176. – С. 75-114.
 73. Ребецкий, Ю.Л. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. / Ю.Л. Ребецкий, А.Ю. Полец // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 469-506.
 74. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. / Л.Н. Поплавская, А.И. Иващенко, Л.С. Оскорбин и др. // Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. – 103 с.
 75. Ризниченко, Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент Ю.В. Ризниченко // Исследование по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. – С. 9-27.
 76. Рикитаке, Т. Предсказание землетрясений / Т. Рикитаки. – М.: Мир, 1979. – 388 с.
 77. Родина, С.Н. Комплексный анализ сейсмологических и сеймотектонических данных для оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: дис. ... кандидата г.-м. наук: 04.00.00 / Родина Светлана Николаевна. – г. Москва, 2013 – 127 с.
 78. Родкин, М.В. О сейсмическом режиме Японии в преддверии мегаземлетрясения Тох-

- оку ($M_w=9$) / М.В. Родкин, И.Н. Тихонов // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 4. – С. 3-12.
79. Романенко, Ю.М. Метод выделения сейсмического затишья SEQ (Seismic Energy Quiescence) на примере Кроноцкого землетрясения $M_w = 7.9$ (Камчатка) / Ю.М. Романенко, П.Г. Дядьков // Современная тектонофизика. Методы и результаты: сб. трудов V молодежной тектонофизической школы-семинара, 9-13 октября 2017 г., Москва. – Москва: ИФЗ РАН, 2017. – С. 327-330.
 80. Салтыков, В.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 года на Камчатке / В.А. Салтыков, Ю.А. Кугаенко // Вулканология сейсмология. – 2000. – № 1. – С. 57-65.
 81. Салтыков, В.А. Отражение подготовки сильных землетрясений 2013 г. в параметрах высокочастотного сейсмического шума / В.А. Салтыков // Сильные Камчатские землетрясения 2013 г. П.-К.: Новая книга, 2014. – С. 115-123.
 82. Салтыков, В.А. Характерные вариации приливной компоненты сейсмических шумов перед сильными землетрясениями: оценка эффективности предвестника / В.А. Салтыков // Триггерные эффекты в геосистемах: сб. трудов III Всероссийского семинара-совещания, 16-19 июня 2015 г., Москва. – Москва: ГЕОС, 2015. – С. 62-69.
 83. Салтыков, В.А. Отклик сейсмических шумов на земные приливы: опыт применения для среднесрочного прогноза землетрясений / В.А. Салтыков, Ю.А. Кугаенко // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XI Международной сейсмологической школы, 10-15 сентября 2016 г., Чолпон-Ата, Кыргызстан. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – С. 289-293.
 84. Салтыков, В.А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений / В.А. Салтыков // Физика Земли. – 2017. – № 2. – С. 84-96.
 85. Смирнов, В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений / В.Б. Смирнов // Вулканология и Сейсмология. – 1997. – № 4. – С. 93-105.
 86. Сидорин, А.Я. Предвестники землетрясений / А.Я. Сидорин. – М.: Наука, 1992. – 190 с.
 87. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А. Соболев. – М.: Наука, 1993. – 313 с.
 88. Соболев, Г.А. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки / Г.А. Соболев, Ю.С. Тюпкин // Вулканология и сейсмология. – 1996. – № 4. – С. 64-74.

89. Соболев, Г.А. Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки / Г.А. Соболев, Ю.С. Тюпкин // Вулканология сейсмология. – 1998. – № 6. – С. 17-26.
90. Соболев, Г.А. Вариации микросейсм перед сильным землетрясением / Г.А. Соболев // Физика Земли. – 2004. – № 6. – С. 3-13.
91. Совместный анализ наземных и спутниковых наблюдений низкочастотных сигналов во время периодов сильной сейсмической активности в Дальневосточном регионе / М.С. Соловьева, А.А. Рожной, Б.В. Левин и др., // Вестник ДВО РАН. – 2013. – № 6. – С. 221- 230.
92. Специализированная станция регистрации сейсмических шумов «Начики» в системе геофизического мониторинга Камчатки / В.А. Салтыков, Синицин В.И., Чебров В.Н. и др., // Сейсмические приборы. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 24-41.
93. Способ среднесрочного прогноза землетрясений / Г.А. Соболев, Ю.С. Тюпкин, В.Б. Смирнов и др. // ДАН. – 1996. – Т. 347, № 3. – С. 405-407.
94. Среднесрочный прогноз сейсмической опасности по югу Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога) / А.С. Закупин, П.А. Каменев, Т.Е. Воронина, Н.В. Богинская // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 52-56.
95. Сыдыков, Ы.К. Некоторые разрушительные землетрясения в истории и их последствия / Ы.К. Сыдыков, У.Х. Маматов, У.А. Турдумамат // Наука и инновационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 285-292.
96. Тихонов, И.Н. Предвестники Нефтегорского землетрясения 1995 г. и современная предвестниковая ситуация на юге Сахалина / И.Н. Тихонов // Память и уроки Нефтегорского землетрясения: сб. трудов научно-технического семинара-совещания, 24-25 мая 2000 г., Южно – Сахалинск. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. – С. 72-74.
97. Тихонов, И.Н. Обнаружение и картирование сейсмических затиший перед сильными землетрясениями Японии / И.Н. Тихонов // Вулканология сейсмология. – 2005. – № 5. – С. 60-76.
98. Тихонов, И.Н. Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий / И.Н. Тихонов – Юж.-Сах: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. – 214 с.
99. Тихонов, И.Н. Методология прогноза сильных землетрясений по потоку сейсмичности на примере северо-западной части тихоокеанского пояса: дис... докт. физ. – мат. наук: 25.00.10 / Тихонов Иван Николаевич. – Южно– Сахалинск, 2008. – 260 с.

100. Тихонов, И.Н. Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 года ($M_LH = 6.2$) на юге о-ва Сахалин / И.Н. Тихонов, Ч.У. Ким // ДАН. – 2008. – Т. 420, № 4. – С. 532-536.
101. Тихонов, И.Н. Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе о. Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. / И.Н. Тихонов // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28, № 5. – С. 22-29.
102. Тихонов, И.Н. Ретроспективная оценка применимости двухэтапной схемы краткосрочного прогнозирования землетрясений ($M \geq 5$) Южного Сахалина по данным детального каталога / И.Н. Тихонов, А.С. Закупин // Вестник ДВО РАН. – 2016. – Т. 185, № 1. – С. 58-67.
103. Тихонов, И.Н. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предваряющих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения / И.Н. Тихонов, В.И. Михайлов, А.И. Малышев // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36, № 1. – С. 5-14.
104. Уломов, В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации; ОСР-97. Комплект карт и другие материалы для Строительных норм и правил – СНиП «Строительство в сейсмических районах» / В.И. Уломов // М.: ОИФЗ, 1998. – 28 с.
105. Успешный прогноз сильнейшего Жупановского землетрясения (30.01.2016., $M_w=7.2$) на основе данных комплексных скважинных измерений / В.А. Гаврилов, Ю.Ю. Бусс, Ю.В. Морозова и др. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. трудов VI научно-технической конференции, 1-7 октября 2017 г., Петропавловск-Камчатский. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 40-43.
106. Федотов, С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии / С.А. Федотов // Труды ИФЗ АН СССР. – 1965. – № 36. – С. 66-93.
107. Федотов, С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе / С.А. Федотов // Сейсмическое районирование СССР. – М.: Наука, 1968. – С. 121-150.
108. Харахинов, В.В. Разломы Сахалина / В.В. Харахинов, С.Д. Гальцев-Безюк, А.А. Терещенков // Тихоокеанская геология. – 1984. – № 2. – С. 77-86.
109. Харахинов, В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона / В.В. Харахинов. – М.: Научный мир, 2010. – 275 с.

110. Чебров, В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России / В.Н. Чебров // Вестник Камчатской региональной организации учебно-научный центр. Серия Науки о Земле. – 2007. – Т. 9, № 1. – С. 27-36.
111. Чебров, В.Н. Опыт выявления предвестников сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС / В.Н. Чебров, В.А. Салтыков, Ю.К. Серафимова // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 85-95.
112. Absence of earthquake correlation with earth tides: An indication of high preseismic fault stress rate / J.E. Vidali, D.C. Agnew, M.J.S. Johnston et al. // Journal Geophysical Research. – 1998. – No. 103. – P. 24567-24572.
113. Aki, K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\lg N = a - b M$ and its confidence limits / K. Aki // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1965. – Vol. 43. – P. 237-239.
114. Anderson, J.G. Consequences of slip rate constraints on earthquake occurrence relation / J.G. Anderson, J.E. Luco // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1983. – Vol. 73. – P. 471-496.
115. Atkinson, B. Earthquake prediction / B. Atkinson // Physics Technology. – 1981. – Vol. 12, No. 2. – P.60-68.
116. Bender, B. Maximum likelihood estimation of b -values for magnitude grouped data / B. Bender // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1983. – Vol. 73. – P. 831–851.
117. Cicerone, R.D. A systematic compilation of earthquake precursors / R.D. Cicerone, J.E. Ebel, J. Britton // Tectonophysics. – 2009. – Vol. 476. – P. 371-396.
118. Development of a new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory / X.C. Yin, Y.C. Wang, K.Y. Peng et al. // Pure and Applied Geophysics. – 2001. – Vol. 157, No. 11– 12. – P. 2365-2383.
119. Draper, N.R. Applied Regression Analysis. 2nd edition. / N.R. Draper, H. Smith // USA: John Wiley and Sons Ltd. – 1981.
120. Evolution Induced Catastrophe / Y.L. Bai, C.S. Lu, F.J. Ke et al. // Physics Letters – 1994. – Vol. 185. – P.196-201.
121. Feng, Y. Parallel Computing for LURR of Earthquake Prediction / Y. Feng, G. Ji, W. Cui // International Journal of Geophysics. – 2012. – P. 567293.
122. Frohlich, C. Teleseismic b -Values: Or, Much Ado about 1.0 / C. Frohlich, S. Davis // Journal of Geophysical Research. - 1993. – Vol. 98. – P. 631-644.

123. Global Hypocenters Data Base, 1989 and its updates through January 2004 / CD-ROM NEIC/USGS // Denver. CO. – 2004.
124. Gomberg, J. Seismicity and detection/location threshold in the southern Great Basin seismic network / J. Gomberg // *Journal Geophysical Research*. – 1991. Vol. 96, No. 10. – P. 16401-16414.
125. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton University Press, Princeton, 1954. – 310 p.
126. Harris, R.A. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implication for seismic hazard / R.A. Harris // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – No. 103. – P. 24347-24358.
127. Healy, J.H. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 / J.H. Healy, V.G. Kossobokov, J.W. Dewey // *U.S. Geological Survey Open-File Report*. – 1992. – Vol. 401, No. 92. – 23 p.
128. Hedayat, A. Precursors to the shear failure of rock discontinuities / A. Hedayat, L.J. Pyrak-Nolte, A. Bobet // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – Vol. 41. – P. 5467-5475. – Doi: 10.1002/2014GL060848.
129. Jones, L. Frequency of foreshocks / L. Jones, P. Molnar // *Nature*. – 1976. – No. 262. – P. 677-679.
130. Kagan, Y.Y. Statistics of characteristic earthquakes / Y.Y. Kagan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1993. – Vol. 83. – P. 7-24.
131. Kagan, Y.Y. Observational evidence for earthquakes as a nonlinear dynamic process / Y.Y. Kagan // *Physica D*. – 1994. – Vol. 77. – P. 160-192.
132. Kagan, Y.Y. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: regional comparison / Y.Y. Kagan // *Journal Geophysical Research*. – 1997. – Vol. 102. – P. 2835-2852.
133. Kanamori, H. Theoretical basis of some empirical relation in seismology / H. Kanamori, Don.L. Anderson // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1975. – Vol. 5, No. 5. – P. 1073-1096.
134. Keilis-Borok, V.I. Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 / V.I. Keilis-Borok, V.G. Kossobokov // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1990. – Vol. 61, No. 1–2. – P. 73-83.
135. Keilis-Borok, V.I. Times of increased probability of strong earthquakes ($M=7.5$) diagnosed by algorithm M8 in Japan and adjacent territories / V.I. Keilis-Borok, V.G. Kossobokov // *Journal Geophysical Research*. – 1990. – Vol. 95, No. 8. – P. 12413-12422.
136. Kelleher, J. Space-time seismicity of Alaska-Aleutian seismic zone / J. Kelleher // *Journal*

- Geophysical Research. – 1970. – Vol. 75. – P. 5745.
137. Kelleher, J. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean / J. Kelleher, L. Sykes, J. Oliver. – Journal Geophysical Research. – 1973. – Vol. 78. – P. 2547.
 138. Kijko, A. Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files .2. Incorporation of Magnitude Heterogeneity / A. Kijko, M.A. Sellevoll // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1992. – Vol. 82, No. 1. – P. 120-134.
 139. Kocharyan, G.G. Traces of laboratory earthquake nucleation in the spectrum of ambient noise / G.G. Kocharyan, A.A. Ostapchuk, D.V. Pavlov // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 18, No. 1. – P. 10764.
 140. Kostylev, D.V. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type / D.V. Kostylev, L.M. Bogomolov, N.V. Boginskaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III National scientific conference with foreign participants «Geodynamical Processes and Natural Hazards» 27–31 May 2019, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation. – 2019. – V. 324.
 141. Krajcinovic, D. Damage Mechanics / D. Krajcinovic // Elsevier Science Publishers. – 1996. – P.439-467.
 142. Lamaitre, J. Formulation and identification of damage kinetic constitutive equations. In continuum Damage Mechanics (ed. Krajcinovic D.) / J. Lamaitre // Springer-Verlag Wien. – 1987. – P. 37-90.
 143. Local Occurrence of the Relationship between Variations in the Earth's Rotation Rate and the Dynamics of Seismicity: Case Study of Sakhalin / B.W. Levin, E.V. Sasorova, A.S. Zakupin et al. // Doklady Earth Science. – 2018. – Vol. 483, No. 2. – P. 1575-1578.
 144. Lomnitz-Adler, J.A. modified form of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation / J.A. Lomnitz-Adler, C.Lomnitz // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1979. – Vol. 69. – P. 1209-1214.
 145. Lopez Pineda, L. Source characteristics of the M (sub w) 6.2 Loreto earthquake of 12 March 2003 that occurred in a transform fault in the middle of the Gulf of California, Mexico / L. Lopez Pineda, C.J. Rebolgar // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – Vol. 95, No. 2. – P. 419-430.
 146. Maeda, K. Significance test for seismicity rate changes before the 1987 Chiba-toho-oki earthquake (M6.7) Japan / K. Maeda, S. Wiemer // Annali di Geofisica. – 1999. – Vol. 42, No. 5. – P. 833-850.
 147. Main, I.G. Apparent Breaks in Scaling in the Earthquake Cumulative Frequency-Magni-

- tude Distribution: Fact or Artifact? / I.G. Main // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2000. – Vol. 90, No. 1. – P. 86–97.
148. Meakin, P. Model for Material Failure and Deformation / P. Meakin // Science. – 1991. – No. 252. – P. 226-234.
 149. Medvedev, S. Neue seismische Skala Intensity scale of earthquakes / S. Medvedev, W. Sponheuer, V. Karník // Tagung der Europäischen Seismologischen Kommission vom 24-30. 09. 1962. Jena, DDR, Berlin: Akademie-Verlag. – 1964. – P.69-76.
 150. Meteorological effects in the lower ionosphere as based on VLF/LF signal observations / A. Rozhnoi, M. Solovieva, B. Levin et al. // Natural Hazards and Earth System Science. – 2014. – Vol. 14, No. 10. – P. 2671-2679. – URL: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-2671-2014>.
 151. Mignan, A. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalog. / A. Mignan, J. Woessner // Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. – 2012. – Doi: 10.5078/ crossa-00180805.
 152. Mogi, K. Migration of seismic activity / K. Mogi // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1968. – No. 46. – P. 53-74.
 153. Mogi, K. Sequential occurrence of recent great earthquake / K. Mogi // Journal Physics of Earthquakes. – 1968. – No. 16. – P. 30-36.
 154. Mogi, K. Some features seismic activity in and near Japan / K. Mogi // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1969. – No. 47. – P. 395-417.
 155. Mogi, K. Relationship between shadow and deep seismicity in the western Pacific region / K. Mogi // Tectonophysics. – 1973. – No. 17. – P. 1-22.
 156. Mogi, K. Active periods in the world's chief seismic belts / K. Mogi // Tectonophysics. – 1974. – No. 22. – P. 265-282.
 157. New Architecture of an Automated System for Acquisition, Storage, and Processing of Seismic Data / A.A. Stepanov, A.V. Gavrillov, A.V. Konovalov et al. // Seismic Instruments. – 2014. – Vol. 50, No. 1. – P. 67-74.
 158. One slope or two? Detecting statistically-significant breaks of slope in geophysical data, with application to fracture scaling relationships / I.G. Main, T. Leonard, O. Papasouliotis et al. // Geophysal Research Letters. – 1999. – Vol. 26. – P. 2801-2804.
 159. Ottemöller, L. SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx / L. Ottemöller, P. Voss, J. Havskov // 2011. URL: <https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software>.
 160. Papadopoulos, G.A. New tool for the temporal variation analysis of seismic parameters /

- G.A. Papadopoulos, I.G. Baskoutas // *Natural Hazards Earthquakes System Science*. – 2009. – Vol. 9. – P. 859-864.
161. Precursory changes of seismicity before the October 4, 1994 Southern Kuril Islands earthquake / V.G. Kossobokov, J.H. Healy, J.W. Dewey et al. // *EOS Transactions*. – 1994. – Vol. 75, No. 44.
 162. Reasenber, P.A. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Preita earthquake / P.A. Reasenber, Simpson R.W. // *Science*. – 1992. – No. 255. – P. 1687-1690.
 163. Reasenber, P.A. Foreshock occurrence before large earthquakes / P.A. Reasenber // *Journal Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104. – P. 4755-4768.
 164. Rydelek, P.A. Testing the completeness of earthquake catalogs and the hypothesis of self_similarity / P.A. Rydelek, Sacks I.S. // *Nature*. – 1989. – Vol. 337. – P. 251-253.
 165. Shi, Y. The standard error of the Magnitude-frequency b-value / Y. Shi, B.A. Bolt // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1982. – V. 72. – P. 1677-1687.
 166. Sobolev, G. The examples of earthquake preparation in Kamchatka and Japan / G. Sobolev // *Tectonophysics*. – 2001. – No. 338. – P. 269-279.
 167. Spatial and temporal evolution of b-values before large earthquakes in Taiwan / C.H. Chan, Y.M. Wu, T.L. Tseng et al. // *Tectonophysics*. – 2012. – Vol. 532–535. – P. 215-222.
 168. Studies and experiments on earthquakes predictions during 1999-2002 / X. Zhang, Z. Fu, A. Niu et al. // *Acta seismologica Sinica*. – 2003. – Vol. 6, No. 5. – P. 508-521. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02893472>.
 169. Surface faults and damage associated with the 1995 Neftegorsk earthquake / T. Shimamoto, M. Watanabe, Y. Suzuki et al. // *Journal Geological Sciences Japan*. – 1996. – Vol.102, No. 10. – P. 894-907.
 170. Tikhonov, I.N. Earthquake Research and Analysis / I.N. Tikhonov, M.V. Rodkin // *Statistical Studies, Observations and Planning*, Dr Sebastiano D'Amico (Ed.). – 2012. – P. 43-78.
 171. The long precursory phase of most large interplate earthquakes / M. Bouchon, V. Durand, D. Marsan et al. // *Nature Geoscience*. – 2013. – Vol. 6, No. 4. – P. 299-302.
 172. The Neftegorsk, Sakhalin Island, earthquake of 27 May 1995 / A.I. Ivashchenko, Ch.U. Kim, L.S. Oskorbin et al. // *The island Arc*. – 1997. – Vol. 6, No 3. – P. 288-302.
 173. Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals / A. Rozhnoi, S. Shalimov, M. Solovieva et al. // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – Vol. 117, No. 9. – A09313. – URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2012JA017761>.
 174. Utsu, T.A. method for determining the value of b in a formula $\lg n = a - bM$ showing the

- magnitude frequency for earthquakes / T.A. Utsu // *Geophysical Bulletin of Hokkaido University*. – 1965. – Vol. 13. – P. 99-103.
175. Utsu, T.A. Introduction to seismicity, *Surijishingaku (Mathematical Seismology)* / T.A. Utsu // *Institute Statistic Math.* – 1992. – V. 34, No. 7. – P. 139-157.
 176. Utsu, T.A. Representation and analysis of the earthquake size distribution: a historical review and some new approaches / T.A. Utsu // *Pure and applied Geophysics*. – 1999. – Vol. 155. – P. 471-507.
 177. Wiemer, S. Seismic quiescence before the Landers ($M=7.5$) and Big Bear ($M = 6.5$) 1992 Earthquakes / S. Wiemer, M. Wyss // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1994. – Vol. 84, No. 3. – P. 900-916.
 178. Wiemer, S. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times? / S. Wiemer, M. Wyss // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 1997. – Vol. 102. – P. 15115-15128.
 179. Wiemer, S. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States and Japan / S. Wiemer, M. Wyss // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2000. – Vol. 90, No. 4. – P. 859-869.
 180. Wiemer, S. Mapping spatial variability of the frequency – magnitude distribution of earthquakes / S. Wiemer, M. Wyss // *Advanced Geophysical*. – 2002. – Vol. 5. – P. 259-302.
 181. Woessner, J. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty / J. Woessner, S. Wiemer // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2005. – Vol. 95. – P. 684-698.
 182. Wyss, M. Seismic quiescence precursor to the 1983 Kaoiki ($M_s=6.6$) Hawaii, earthquake / M. Wyss // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1986. – Vol. 76. – P. 785-800.
 183. Wyss, M. Precursory seismic quiescence / M. Wyss, R. E. Habermann // *Pure and applied Geophysics*. – 1988. – Vol. 126, No. 2-4.
 184. Wu, H.C. Multi-parametric analysis of earthquake precursors / H.C. Wu, I.N. Tikhonov, A.R. Cesped // *Russian Journal Earth*. – 2015. – No. 15. – ES3002. – URL: <http://dx.doi.org/10.2205/2015ES000553>.
 185. Yin, X. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction / X. Yin, C. Yin // *Science in China*. – 1991. – No. 34. – P. 977-986.
 186. Yin, X.C. A new approach to earthquake prediction / X.C. Yin // *Russia's Nature*. – 1993. – No. 1. – P. 21-27.

187. Yin, X.C. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction – The load-unload response ratio theory / X.C. Yin, C. Yin, X.Z. Chen // Nonlinear dynamics and predictability of geophysical phenomena. Geophysical Monograph. - 1994. – Vol. 18. – P. 55-60.
188. Yin, X.C. A new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory / X.C. Yin // Pure and Applied Geophysics. – 1995. – Vol. 145, No. 3-4. – P. 701-715.

