

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.343(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.1.027-045>

Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы

© 2021 А. С. Закупин*, Н. В. Богинская

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

**E-mail: a.zakupin@imgg.ru*

Резюме. Представлены результаты ретроспективного анализа сейсмичности Сахалина методом среднесрочного прогноза землетрясений LURR за 1997–2019 гг. Все ранее проведенные по разным исходным данным расчеты приведены к единой базе сейсмологических данных по каталогу Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». В новом исследовании сканирование территории Сахалина выполнено, как и ранее, расчетными областями в виде окружностей радиусом в один градус, но разрешение увеличено. Вся территория покрывается такими зонами с шагом через 0.5 градуса по широте и долготе, а в трех наиболее опасных сейсмогенерирующих зонах сетка детализируется до 0.1 градуса. В результате увеличено количество расчетных выборок. Это позволило исключить пропуск аномалий параметра LURR при проведении расчетов. За счет обоснованной привязки нижней границы магнитуды для прогнозируемых событий к верхней границе диапазона магнитуд расчетной выборки ($M = 5$) за исследуемый период количество объектов для ретроспективного прогноза возросло в три раза. По территории острова обработаны 323 расчетные выборки (из них 119 основных и 204 детализованных). Удовлетворительное для расчета ретроспективного прогноза количество землетрясений содержали 36 основных и все детализованные выборки. Получены 15 тревожных периодов, которые территориально представляют все зоны генерации умеренных и сильных землетрясений на Сахалине. В результате 17 землетрясений из 19 с $M \geq 5$ оказались в зонах с аномалиями в периоды тревоги, не превышающие 3 лет. Из 15 периодов 4 оказались ложными. Таким образом, 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, каталог землетрясений, аномалия, прогноз

Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches

Alexander S. Zakupin*, Nataliya V. Boginskaya

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**E-mail: a.zakupin@imgg.ru*

Abstract. The work presents the results of a retrospective analysis of the seismicity of Sakhalin using the LURR method of mid-term earthquake prediction for 1997–2019. All previously performed computations are reduced to a single database of seismological data (catalogue) of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center “United Geophysical Survey of RAS”. Similar to previous studies, the Sakhalin territory was scanned by applying computational areas in the form of circles with a radius of one degree; however, the resolution was increased. The entire territory was covered by such zones with a step of 0.5 degrees in latitude and longitude, with the grid being detailed down to 0.1 degrees in three most dangerous seismogenenerating zones. As a result, the number of computational samples was increased, which allowed the omission of anomalies in the LURR parameter during computations to be avoided. Due to a reasonable binding of the lower bound of the magnitude for predicted events to the upper bound of the magnitude range of the

computational sample ($M = 5$), the number of objects for the retrospective forecast was increased by 3 times for the study period. 323 computational samples (119 of which are basic and 204 ones are detailed) were processed on the territory of the island. 15 alarm periods were obtained, which geographically represent all zones of moderate and strong earthquake generation on Sakhalin Island. As a result, 17 out of 19 earthquakes with $M \geq 5$ occurred in the areas with anomalies during the alarm periods not exceeding three years. Out of 15 periods, 4 turned to be false. Thus, 75 % of the alarms predicted 89 % of the earthquakes.

Keywords: seismicity, seismic events, LURR method, earthquake catalogue, anomaly, forecast (prediction)

Для цитирования: Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с. 27–45. (Article first publ. online 20 Jan 2021. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112169>). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.1.027-045>

For citation: Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 27–45. (In Russ., abstr. in Engl.). (Article first publ. online 20 Jan 2021. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112169>). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.1.027-045>

Введение

В последние несколько лет сотрудники Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) получили методом LURR [Yin et al., 2001] интересные результаты в области среднесрочных прогнозов землетрясений на Сахалине [Закупин и др., 2018; Закупин и др., 2020]. Так, за 1988–2019 гг. было выявлено 7 областей, в которых зафиксированы аномальные значения параметра LURR (аномалии). В этих областях затем (в сроки, не превышающие 2 лет и определяющие период тревоги) происходили сильные землетрясения. Примечательно, что часть прогнозов была сделана в реальном времени [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018]. Два землетрясения из семи (Онорское 14.08.2016, $M = 5.8$, и Крильонское 23.04.2017, $M = 5.0$) явились реализациями прогнозов, которые рассматривались на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (протокол № 3 от 11.05.2016, протокол № 2 от 16.03.2017). Оба прогноза были признаны полностью реализованными [Закупин и др., 2018; Закупин и др., 2020].

Авторы разработали методики по использованию алгоритма LURR, которые отличаются универсальностью в выборе параметров обработки, что обеспечивает возможность повторения полученных результатов и невозможность их «подгонки». Действительно, в отличие от работ [Yin et al., 2001; Yin et al., 2006], в которых расчетные параметры менялись для каждого прогноза (что делает невозможным оперативный прогноз), в наших работах они имеют фиксированные значения. Так, были определены: диапазон магнитуд в рабочей вы-

борке (от 3.3 до 5), величины скользящего окна (360 дней) и сдвига (30 дней), вид и размер области для расчета (окружность радиусом в 1°). С применением перечисленных параметров в расчетах по методу LURR для разных частей о. Сахалин были получены, на наш взгляд, весьма убедительные результаты с количеством успешных ретроспективных прогнозов не менее 85 % для сильных землетрясений ($M \geq 5.5$). [Закупин и др., 2018]. Нужно отметить, что для определения фиксированных значений универсальных параметров потребовалось подготовить и рассчитать несколько сотен вариантов расчетных выборок (комбинаций 5 параметров) в ручном режиме.

Однако установление степени надежности и практической применимости метода требовало уточнения исходной базы данных и некоторых параметров. Прежде всего вопрос о достоверности сейсмологических данных. Дело в том, что в разные периоды времени ретроспективный анализ основывался на разных каталогах землетрясений. Вопрос об их соответствии друг другу тогда не возникал, они применялись по принципу доступности. Первые прогнозы в 2015 г. были получены с использованием каталога под ред. Л.Н. Поплавской [Поплавская (ред.), 2006] для территории выше 52° N. Основная цель была изучить а posteriori возможность прогноза Нефтегорского землетрясения (1995 г., $M = 7.2$), а потому рассматривался период с 1988 по 2005 г. (последняя запись в каталоге). Результат был успешным. Более того, была обнаружена ранее не зафиксированная зона тревоги (ретроспективный прогноз) для Пильтунского землетрясения (2005 г., $M = 5.5$). Для анализа южной

части острова применялся каталог локальной сети Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) (он отличается от итоговых данных, публикуемых в ежегодных сборниках и составляющих так называемый официальный каталог). С его помощью был получен ретроспективный анализ Невельского землетрясения (2007 г., $M = 6.2$), а также установлено отсутствие зоны тревоги для Горнозаводского землетрясения (2006 г., $M = 5.6$). Для анализа северной части Сахалина после 2005 г. был использован локальный каталог ИМГиГ ДВО РАН [Stepnov et al., 2014], источником данных для которого служили 5 станций, сгруппированных от Арги-Паги до Охи практически в линию. Как выяснилось позже, по качеству полученных по нему прогнозов он значительно уступал каталогу сети СФ ФИЦ ЕГС РАН, что и было показано в одной из недавних наших работ [Закупин, Богинская, 2020]. С помощью каталога ИМГиГ ДВО РАН были получены зоны тревоги для Уангского (2010 г., $M = 5.4$) и Онорского (2016 г., $M = 5.8$) землетрясений. И наконец, с 2017 г. мы применяем в расчетах официальный каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, который формируется с 1997 г. и непрерывно пополняется в виде ежегодных выпусков (например, [Сохатюк и др., 2016]). С помощью этого каталога выявлена зона тревоги для Крильонского землетрясения (2017 г., $M = 5.0$).

Такое разнообразие первичных данных, безусловно, требовало проверки достоверности результатов, а также универсальности методики. Тем более что Углегорское землетрясение (2000 г., $M = 7$), считавшееся пропущенным, в 2020 г. оказалось ретроспективно прогнозируемым (рассчитано по данным двух каталогов). Предпочтительным вариантом стало применение каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН, который содержит данные для всех районов Сахалина и дает возможность проверить все ранее полученные результаты.

Второй аспект аргументированности наших результатов связан с магнитудой проверяемого (прогнозируемого) землетрясения. Верхний предел ожидаемого события определялся по сеймотектоническим моделям с зонами возможных очагов землетрясений (ВОЗ) [Левин и др., 2012]. С нижним пределом не все было очевидно. Казалось бы, если рабочая выборка имеет верхней границей $M = 5$, то и ниж-

ним пределом прогноза следовало бы установить такую же магнитуду. Но с учетом того, что все наши зоны тревог были получены для сильных землетрясений с $M > 5.5$, мы определили его в $M \geq 5.5$ – видимо, стремясь таким образом избежать очевидных пропущенных целей. Однако, когда в 2017 г. в зоне тревоги LURR в районе п-ова Крильон произошло землетрясение с $M = 5$, стало ясно, что при наблюдении определенного нами магнитудного порога этот факт должен квалифицироваться не как удачный прогноз, а как ложная тревога. Значит, нижний порог ожидания можно обоснованно увязать с верхней границей рабочей выборки и считать его $M = 5$.

Далее необходимо было провести расчеты на всей территории острова, с убедительным количеством выборок, и определить порог отсека аномалий (уровень дискриминации на графиках распределения параметра LURR). Порог отсека аномалий можно не просто установить выше 1 (как в работах [Yin et al., 2001; Yin et al., 2006]), а опереться на правило трех сигм (утверждающее, что вероятность того, что случайная величина отклонится от своего математического ожидания более чем на три среднеквадратических отклонения, практически равна нулю). В теории LURR в фоновом процессе математическое ожидание единица, следовательно, этот порог просто равен трем.

Ну и наконец, время тревоги. Ранее на основе ретроспективного анализа мы остановились на двух годах. В данной работе на основе полученных результатов зафиксируем реальные значения постфактум.

В работе использован названный выше единый каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, который признан научным сообществом в России. Проведение расчетов на единой базе сейсмологических данных, естественно, обусловило некоторые корректировки ранее полученных результатов.

В статье анализируется и переосмысливается шестилетний опыт работ, проведенных группой ученых-сейсмологов на о. Сахалин. Детальное описание сущности метода, обилие первичных данных, расчетов в виде карт и таблиц продиктованы стремлением сделать прозрачным весь алгоритм применения метода, не имеющего пока единой общепринятой методики.

Обработка данных и инструменты анализа

Сейсмические каталоги

Используемый в данной статье каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН начиная с 1997 г. отражает все происходящие сейсмические события, каждое из которых имеет конкретную запись в определенном пункте на определенной аппаратуре, включающую параметр гипоцентра, магнитуду, энергетический класс, механизм очагов по инструментальным наблюдениям, а также макросейсмические данные. Периодические данные для каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН в настоящее время выпускаются в ежегодных сборниках и серийном издании «Землетрясения России».

Для расчетов по методу LURR необходимы длинные ряды сейсмологических сводок в широком магнитудном диапазоне. Учитывая, что в каталогах СФ ФИЦ ЕГС РАН применяются разные магнитудно-энергетические шкалы, встала острая необходимость систематизации и унификации данных по энергетическому значению.

В практике сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке РФ для оценки величины землетрясений применяются разные магнитудно-энергетические шкалы и энергетические классы K_s [Соловьев, Соловьева, 1967] и K_r [Раутиан, 1960 а, б]. Для единой классификации событий по каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН за период 1997–2019 гг. авторы данного исследования пересчитали значения энергетических классов K_s и K_r неглубокофокусных землетрясений о. Сахалин в локальную магнитуду M_L по формулам [Соловьев, Соловьева, 1967] и [Раутиан, 1960 а, б]: $M_L = (K_s - 1.2)/2$ и $M_L = (K_r - 4)/1.8$.

Так как авторам для исследования не было необходимости использовать глубокофокусные землетрясения, то пересчет магнитуд для них не проводился, учитывали ту магнитуду (M_{SH} или $M_{SH}(A)$), какая представлена в изначальном каталоге СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Отметим, что непрерывно пополняемый путем периодических изданий каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН позволяет применять данные, обладающие преимуществом в плане подготовки и обработки, что очень важно для будущих прогнозов.

Программы и методы обработки

В названии метода LURR (load-unload response ratio) отражен физический подход – изучение отношения откликов среды в услови-

ях нагрузки и разгрузки. Отклик среды – это землетрясение, а влияние внешних сил на напряженно-деформированное состояние в его очаге – это сумма тектонических, литостатических и приливных компонент. Подвижка в очаге происходит очень быстро, практически мгновенно, и медленно меняющиеся компоненты, такие как тектоническая и литостатическая составляющие, не влияют на динамику напряжений. Другое дело приливные напряжения – при небольших абсолютных значениях они имеют высокий градиент и могут быть использованы как стабильный, калиброванный инструмент оценки состояния нагрузки и разгрузки в очаге. В работе [Закупин и др., 2020] физические принципы и основные математические формулы мы привели на русском языке максимально близко к оригиналу [Yin et al., 2001; Yin et al., 2006], а в данном разделе пошагово опишем алгоритм расчета, основанный на подходах, описанных в этих работах. Однако прежде чем это сделать, изложим принципы выбора данных для проведения расчета.

Для обработки данных методом LURR применялся разработанный в ИМГиГ ДВО РАН [Закупин, 2016] запатентованный программный комплекс Seis-ASZ. Территория Сахалина была разбита на 119 зон (окружностей радиусом 1°) с шагом в 0.5° по широте и долготе. Устойчивость аномалий также проверяется на сетке в южном сегменте с шагом детализации через 0.1° . В каждой зоне определяется общее количество землетрясений и количество землетрясений в рабочей выборке ($M = 3.3\text{--}5.0$). Представительность рабочей выборки для анализа ограничена средним количеством событий – не менее 10–15 в год (меньшее количество при окне в 360 дней гарантирует случайные выбросы). За 22 года такой порог может составлять около 300 событий. В табл. 1 приведены параметры для всех расчетных областей, зеленым цветом отмечены зоны, для которых расчет может быть проведен, а розовым – недопустимые для расчета.

В итоге всего 36 зон из 119 можно использовать для расчета. Наименьшую представительность имеют центральные области, по этой причине мы ранее не включали их в зону анализа, однако отметим, что несколько областей в районе г. Углегорск (и одноименного землетрясения) пригодны к расчету. На рис. 1 рассмотрены примеры расчета в двух областях для демонстрации определения порога, а также для классификации аномалий.

Таблица 1. Расчетные зоны (выделены зеленым) для Сахалина (каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг.)
 Table 1. Computational areas for Sakhalin (the catalog of 1997–2019 of SB FRC UGS RAS)

Зона (центр)	46.0 N, 141.0 E	46.0 N, 141.5 E	46.0 N, 142.0 E	46.0 N, 142.5 E	46.0 N, 143.0 E	46.0 N, 143.5 E	46.0 N, 144.0 E
Всего событий	542	2091	2324	1814	851	330	147
M = 3.3–5	137	458	520	382	249	163	89
Зона (центр)	46.5 N, 141.0 E	46.5 N, 141.5 E	46.5 N, 142.0 E	46.5 N, 142.5 E	46.5 N, 143.0 E	46.5 N, 143.5 E	46.5 N, 144.0 E
Всего событий	1588	2469	3082	3401	1683	613	207
M = 3.3–5	335	474	569	640	327	144	68
Зона (центр)	47.0 N, 141.0 E	47.0 N, 141.5 E	47.0 N, 142.0 E	47.0 N, 142.5 E	47.0 N, 143.0 E	47.0 N, 143.5 E	47.0 N, 144.0 E
Всего событий	1433	2396	3258	3241	1603	886	223
M = 3.3–5	322	420	539	532	219	131	39
Зона (центр)	47.5 N, 141.0 E	47.5 N, 141.5 E	47.5 N, 142.0 E	47.5 N, 142.5 E	47.5 N, 143.0 E	47.5 N, 143.5 E	47.5 N, 144.0 E
Всего событий	338	1843	2727	2123	1445	837	173
M = 3.3–5	98	378	486	310	193	118	31
Зона (центр)	48.0 N, 141.0 E	48.0 N, 141.5 E	48.0 N, 142.0 E	48.0 N, 142.5 E	48.0 N, 143.0 E	48.0 N, 143.5 E	48.0 N, 144.0 E
Всего событий	166	645	1378	1479	943	322	83
M = 3.3–5	38	174	347	377	208	64	21
Зона (центр)	48.5 N, 141.0 E	48.5 N, 141.5 E	48.5 N, 142.0 E	48.5 N, 142.5 E	48.5 N, 143.0 E	48.5 N, 143.5 E	48.5 N, 144.0 E
Всего событий	267	683	996	994	714	260	67
M = 3.3–5	85	236	337	340	263	82	24
Зона (центр)	49.0 N, 141.0 E	49.0 N, 141.5 E	49.0 N, 142.0 E	49.0 N, 142.5 E	49.0 N, 143.0 E	49.0 N, 143.5 E	49.0 N, 144.0 E
Всего событий	253	748	1006	1022	680	184	30
M = 3.3–5	82	265	370	365	259	83	17
Зона (центр)	49.5 N, 141.0 E	49.5 N, 141.5 E	49.5 N, 142.0 E	49.5 N, 142.5 E	49.5 N, 143.0 E	49.5 N, 143.5 E	49.5 N, 144.0 E
Всего событий	121	490	864	835	456	104	36
M = 3.3–5	38	160	325	332	187	58	20
Зона (центр)	50.0 N, 141.0 E	50.0 N, 141.5 E	50.0 N, 142.0 E	50.0 N, 142.5 E	50.0 N, 143.0 E	50.0 N, 143.5 E	50.0 N, 144.0 E
Всего событий	62	249	372	423	300	136	49
M = 3.3–5	22	83	142	183	136	71	27
Зона (центр)	50.5 N, 141.0 E	50.5 N, 141.5 E	50.5 N, 142.0 E	50.5 N, 142.5 E	50.5 N, 143.0 E	50.5 N, 143.5 E	50.5 N, 144.0 E
Всего событий	9	196	368	380	274	121	70
M = 3.3–5	36	83	146	156	130	65	36
Зона (центр)	51.0 N, 141.0 E	51.0 N, 141.5 N	51.0 N, 142.0 E	51.0 N, 142.5 E	51.0 N, 143.0 E	51.0 N, 143.5 E	51.0 N, 144.0 E
Всего событий	30	188	342	430	372	148	65
M = 3.3–5	11	77	149	183	167	69	28
Зона (центр)	51.5 N, 141.0 E	51.5 N, 141.5 E	51.5 N, 142.0 E	51.5 N, 142.5 E	51.5 N, 143.0 E	51.5 N, 143.5 E	51.5 N, 144.0 E
Всего	60	249	453	520	392	197	49
M = 3.3–5	24	119	216	253	173	90	22
Зона (центр)	52.0 N, 141.0 E	52.0 N, 141.5 E	52.0 N, 142.0 E	52.0 N, 142.5 E	52.0 N, 143.0 E	52.0 N, 143.5 E	52.0 N, 144.0 E
Всего событий	78	269	706	982	893	454	62
M = 3.3–5	33	146	334	500	448	221	31
Зона (центр)	52.5 N, 141.0 E	52.5 N, 141.5 E	52.5 N, 142.0 E	52.5 N, 142.5 E	52.5 N, 143.0 E	52.5 N, 143.5 E	52.5 N, 144.0 E
Всего событий	65	237	922	1170	1094	732	57
M = 3.3–5	26	139	484	617	578	381	35
Зона (центр)	53.0 N, 141.0 E	53.0 N, 141.5 E	53.0 N, 142.0 E	53.0 N, 142.5 E	53.0 N, 143.0 E	53.0 N, 143.5 E	53.0 N, 144.0 E
Всего событий	39	115	989	1029	933	769	60
M = 3.3–5	19	51	521	535	481	419	34
Зона (центр)	53.5 N, 141.0 E	53.5 N, 141.5 E	53.5 N, 142.0 E	53.5 N, 142.5 E	53.5 N, 143.0 E	53.5 N, 143.5 E	53.5 N, 144.0 E
Всего событий	45	128	500	880	808	460	45
M = 3.3–5	20	51	249	462	433	241	29
Зона (центр)	54.0 N, 141.0 E	54.0 N, 141.5 E	54.0 N, 142.0 E	54.0 N, 142.5 E	54.0 N, 143.0 E	54.0 N, 143.5 E	54.0 N, 144.0 E
Всего событий	65	151	289	404	373	98	15
M = 3.3–5	30	62	144	201	188	53	8

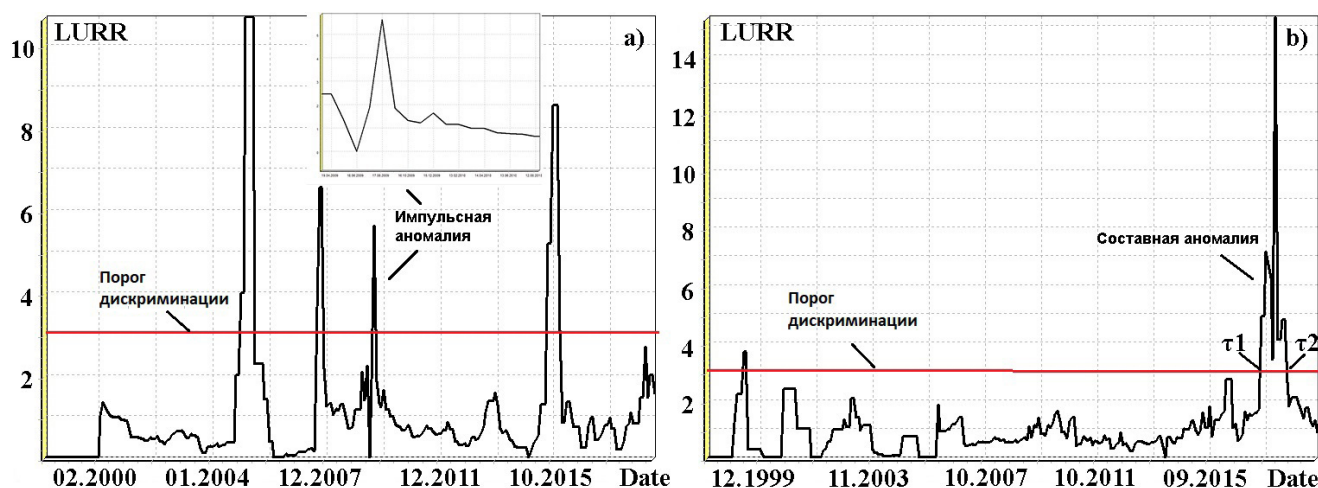


Рис. 1. Примеры расчета параметра LURR для областей с центрами: (а) 48.5° N, 142.5° E, (б) 47.0° N, 141.5° E.

Figure 1. Examples of computing the LURR parameter for the areas with centers: (a) 48.5° N, 142.5° E, (b) 47.0° N, 141.5° E.

Резкие скачки, которые дают превышение порога величиной 3 (правило трех сигм) всего за счет одной расчетной точки, могут носить случайный характер. Такие одиночные аномалии, импульсного типа, не фиксируются как предвестники (пример на рис. 1 а), однако если есть череда таких импульсов (подряд), то их можно считать аномалией. Составная аномалия, на которой выделяется нескольких пиков (пример на рис. 1 б, три пика) и которая носит продолжительный характер, считается одним целым, если при переходе от пика к пику параметр не вернулся к фоновым значениям. Время появления такой аномалии считается по выходу за установленный предел (3) первого пика. На левом графике в итоге 3 аномалии, на правом всего одна.

Алгоритм расчета методом LURR продемонстрируем на расчетной области (на карте в форме эллипса) с координатами (центром эллипса) 48.5° N, 142.5° E (рис. 1 а).

Из 994 событий, попадающих в данный эллипс, в рабочем диапазоне находятся 340 землетрясений (табл. 1). На первом этапе для каждого из них выполняются следующие действия. В эпицентре каждого землетрясения рассчитываются компоненты приливных смещений, формируемых гравитационным потенциалом при взаимодействии системы из трех объектов: Земля–Солнце–Луна. На основании модели жесткой и упругой Земли (с тремя упругими константами) рассчитываются компоненты тензора напряжений. По матрице направляющих косинусов (по углам dip, strike и rake) они приводятся к площадке (так называемая нодальная плоскость), на которой рас-

полагается вектор скольжения в момент времени, когда произошло расчетное землетрясение. Напряжения рассчитываются в нескольких точках до, во время и после землетрясения таким образом, чтобы определить динамику изменения приливной компоненты.

Полученные напряжения используются для расчета критерия разрушения Кулона–Мора и определения динамики эффективного касательного напряжения (τ). В итоге мы получаем для каждого землетрясения определение, какую роль приливные возмущения играли в момент разрыва (или подвижки) – снижали или увеличивали эффективное касательное напряжение. Землетрясения первого типа становятся условно «отрицательными», а второго – «положительными».

На заключительном этапе проводится расчет параметра LURR. На этом этапе расчеты разных исследователей могут различаться, так как параметры расчетной модели могут быть выбраны разные. Расчет выполняется суммированием в заданном окне (у нас оно постоянно и равно 360 дней) значений заданного параметра (мы выбрали энергию Беньоффа) для всех «положительных» и всех «отрицательных» землетрясений в области (340 событий), а затем вычислением отношения этих сумм. В расчетном периоде (22 года) окно перемещается с шагом в 30 дней (также наш выбор), т.е. количество точек (значений параметра LURR) на графике больше 250. Именно эти значения и наносятся на график. Важно помнить, что точка на графике ставится в середине окна осреднения, т.е. фактические данные в расчете используются с лагом на полгода вперед.

Для нашего примера на рис. 1 а аномалии фиксируются по времени первого превышения заданного дискриминатора – 11.09.2005, 23.12.2008 и 16.02.2016.

Для определения целей прогноза (землетрясений с $M \geq 5$) необходимо провести декластеризацию. Декластеризация выполнена с помощью вычислительных программ идентификации кластеров землетрясений в четырех вариантах [Gardner, Knopoff, 1974; Uhrhammer 1986; Reasenber, 1985; Grünthal et al., 2009]. Использовался программный комплекс ZMAP [Wiemer, 2001], в котором все четыре алгоритма реализованы. В исходном каталоге (1997–2019 гг.) имеется 7115 событий. Из них 28 событий с $M \geq 5$ (не считая глубоководные землетрясения, которые в методе LURR не рассматриваются как прогнозные). После декластеризации таковых осталось 19. По 18 из них были получены полностью согласованные результаты по всем четырем алгоритмам декластеризации, и лишь одно со-

храняется в двух случаях и исключено в двух других. Тем не менее, мы включаем в анализ все 19 землетрясений.

Результаты и обсуждение

На основе анализа полученных распределений параметра LURR для 36 расчетных областей по каталогу 1997–2019 гг. в них были выделены аномалии, для каждой из которых приведено время появления (первая точка после превышения уровня дискриминации) (табл. 2). Всего в этих зонах за 22 года выявлено 77 аномалий, они были сгруппированы по времени и пространству.

Цветом в табл. 2 выделены аномалии, которые появляются на периодах не более 2 лет, это позволяет объединить их в группы по времени. Каждая группа подразделяется на подгруппы – области, которые расположены рядом, образуют объединенные области прогноза, и в них выделяется период тревоги (с момента появления первой аномалии

Таблица 2. Аномалии LURR по расчетным областям (по каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019) и время их появления (шаг 0.5°)

Table 2. The LURR anomalies by computational areas (the catalog of 1997–2019 of SB FRC UGS RAS) and their occurrence time (step 0.5°)

Зона (центр)	Время появления аномалии LURR	Зона (центр)	Время появления аномалии LURR
46.0 N, 141.5 E	25.01.2000; 10.07.2002; 01.08.2015	48.5 N, 142.5 E	11.09.2005; 23.12.2008; 16.02.2016
46.0 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002; 26.07.2015	49.0 N, 142.0 E	25.12.2008; 20.10.2015
46.0 N, 142.5 E	22.01.2000	49.0 N, 142.5 E	25.12.2008; 20.11.2015
46.5 N, 141.0 E	09.05.2007; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018	49.5 N, 142.0 E	12.02.2000; 19.08.2015; 04.10.2018
46.5 N, 141.5 E	15.08.1999; 09.04.2001	49.5 N, 142.5 E	26.11.2008
46.5 N, 142.0 E	23.10.1999; 09.04.2001; 27.06.2001	52.0 N, 142.0 E	17.06.2001; 28.08.2004; 14.12.2007; 07.06.2014
46.5 N, 142.5 E	22.01.2000	52.0 N, 142.5 E	28.08.2004; 05.08.2014
46.5 N, 143.0 E	23.06.2009	52.0 N, 143.0 E	28.08.2004; 05.08.2014
47.0 N, 141.0 E	14.09.2006	52.5 N, 142.0 E	06.02.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
47.0 N, 141.5 E	10.01.2018	52.5 N, 142.5 E	03.08.2014; 23.11.2016
47.0 N, 142.0 E	06.07.2018	52.5 N, 143.0 E	05.09.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
47.0 N, 142.5 E	–	52.5 N, 143.5 E	28.08.2004; 04.03.2009; 05.09.2014; 23.11.2016; 17.06.2018
47.5 N, 141.5 E	20.04.2016; 06.07.2018	53.0 N, 142.0 E	04.07.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
47.5 N, 142.0 E	16.01.2001; 10.04.2018	53.0 N, 142.5 E	04.07.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
47.5 N, 142.5 E	01.08.2003; 04.12.2008; 25.06.2016; 15.04.2018	53.0 N, 143.0 E	04.07.2014; 23.11.2016; 15.04.2018
48.0 N, 142.0 E	10.09.2005; 22.12.2008; 14.06.2010; 15.02.2016; 04.02.2018	53.0 N, 143.5 E	23.11.2016; 15.04.2018
48.0 N, 142.5 E	28.10.2008; 20.02.2016; 08.04.2018	53.5 N, 142.5 E	06.07.2008; 12.11.2016; 15.07.2018
48.5 N, 142.0 E	11.09.2005; 23.12.2008; 18.11.2015	53.5 N, 143.0 E	23.11.2016; 15.04.2018

в подгруппе). Например, желтый цвет – это три периода тревоги: 1) семь областей с аномалиями на юге острова, появившихся с августа 1999 по июнь 2001 г., создают зону тревоги с 45.0° по 47.5° N. Реализацией для периода тревоги в этом районе стало землетрясение в 2001 г. (Такойский рой); 2) область с аномалией в феврале 2000 г. в центральной части острова (49.5° N, 142.0° E). Реализацией стало Углегорское землетрясение в августе 2000 г.; 3) область с аномалией в июне 2001 г. в северной части острова (52.0° N, 142.0° E). Это тот случай, когда после появления аномалии в течение 3 лет землетрясений в области не произошло и зафиксирована ложная тревога.

Другой пример – это бирюзовый цвет: аномалии в 12 областях с мая 2015 по июнь 2016 г. и один тревожный период (все зоны перекрываются). Область прогноза очень большая – весь центральный и южный Сахалин. Реализацией стали Онорское землетрясение в 2016 г. и Крильонское в 2017 г. соответственно.

Всего за 22 года в разных частях острова установлено 15 периодов тревоги, причем они были представлены разным количеством расчетных областей и, соответственно, разной площадью территорий, которые они занимали. Результаты показаны на картах ниже (рис. 2–5), на них же нанесены землетрясения ближайшие по времени к периодам тревоги (не позднее 3 лет после появления аномалии). Если землетрясение попадает в область прогноза, то оно считается ретроспективно спрогнозированным, а если нет, то пропущенным.

Расчеты, как сказано выше, проведены для областей со смещением по широте и долготе в 0.5° . Конечно, возникает вопрос о детальности: как сильно дальнейшее уменьшение шага скажется на результате. Для проверки устойчивости аномалий в отдельно взятой области необходимо изучить поведение параметра LURR в областях, отстоящих на максимально возможное близкое расстояние друг от друга. Мы провели детальное сканирование (с шагом 0.1°) нескольких участков с наибольшей плотностью сейсмических событий расчетных выборок (зоны Углегорского, Нефтегорского и Невельского землетрясений). На двух участках преемственность сохранялась, т.е. новых аномалий не появлялось, а старые аномалии (находящиеся в узловых зонах) присутствовали.

Исключением стал участок, где расположены эпицентры Невельского и Горнозаводского

землетрясений. Эти два землетрясения по времени появляются с разницей в один год, а расположены недалеко друг от друга. В целом сложный случай с точки зрения прогноза при осреднении ряда окном 360 дней в области размером 200 км. Любая область с аномалией в данном районе начиная с 2004 г. может быть прогнозной для обоих землетрясений. Отметим, что ранее для Горнозаводского землетрясения аномальный период зафиксирован не был [Закупин и др., 2018]. В результате расчетов в 68 областях (табл. 3) определено, что аномалии в узловых (совпадают с табл. 2) и промежуточных точках одинаковы, т.е. 6 аномалий (1999–2001, 2002, 2007, 2011, 2015, 2018 гг.) повторяются в узлах и присутствуют в сегменте. Различия отмечены для областей промежуточных лишь на одном периоде – в 5 случаях появилась новая аномалия 2004 г. В табл. 3 периоды появления аномалий сгруппированы также по цветам, а самый массовый 1999–2001 гг. оставлен незакрашенным. В качестве рекомендации для дальнейших исследований можно предложить практику такой детализации (позволившей выявить дополнительные аномалии для прогноза Горнозаводского землетрясения), однако это существенно увеличивает затраты ресурсов.

В табл. 4 показаны 19 землетрясений, которые остались в нашем каталоге после декластеризации. Серым цветом выделены землетрясения, перед которыми аномалии зафиксированы не были. Не выделены цветом события, перед которыми есть аномалии и которые расположены в тревожных зонах. К ним также причислены два землетрясения (№ 7 и № 13), которые немного (не более 15 км) отклоняются от зоны тревоги, но по времени соответствуют наблюдаемым перед ними аномалиям. В итоге из 19 землетрясений 17 попадают в области тревоги (табл. 3). Периоды тревоги для каждого землетрясения в табл. 4 выделены по первой (τ_1) точке при выходе аномалии за уровень дискриминации ($T1$) и последней точке (τ_2) перед возвращением параметра к фоновым значениям ($T2$). Например, на юге ряд аномалий из семи областей «желтой» группы (табл. 3) появляется в конце 1999 г. и завершается уже в 2001, а те, что появляются в 2000, также завершаются в 2001 г. Большинство аномалий имеют, как правило, длительность несколько месяцев (некоторые доходят до года). Если в данном случае период тревоги отсчитывать от τ_2 ($T2$),

Таблица 3. Аномалии LURR в локальной области 46.0° N, 141.0° E – 46.5° N, 142.0° E по каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг. и время их появления (шаг 0.1°)

Table 3. The LURR anomalies in the local area 46.0° N, 141.0° E – 46.5° N, 142.0° E according to the catalog of 1997–2019 of SB FRC UGS RAS and their occurrence time (step 0.1°)

Зона (центр)	Время появления аномалии LURR	Зона (центр)	Время появления аномалии LURR
46.0 N, 141.0 E	15.08.2010; 20.07.2015; 08.01.2018	46.3 N, 141.0 E	09.05.2007; 26.01.2010; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018
46.0 N, 141.1 E	09.05.2007; 13.04.2011; 20.07.2015; 08.01.2018	46.3 N, 141.1 E	19.12.1999; 19.03.2011; 27.07.2015; 14.01.2018
46.0 N, 141.2 E	19.12.1999; 09.05.2007; 26.07.2015	46.3 N, 141.2 E	19.12.1999; 27.05.2015
46.0 N, 141.3 E	19.12.1999; 26.07.2015	46.3 N, 141.3 E	19.12.1999; 11.04.2001
46.0 N, 141.4 E	19.12.1999	46.3 N, 141.4 E	19.12.1999; 11.04.2001; 23.08.2004
46.0 N, 141.5 E	19.12.1999; 01.05.2002; 01.08.2015	46.3 N, 141.5 E	19.12.1999; 11.04.2001; 24.01.2004
46.0 N, 141.6 E	19.12.1999; 01.05.2002; 23.08.2004	46.3 N, 141.6 E	19.12.1999; 11.04.2001
46.0 N, 141.7 E	19.12.1999; 01.05.2002; 23.08.2004; 26.07.2015	46.3 N, 141.7 E	09.01.2001
46.0 N, 141.8 E	19.12.1999; 01.05.2002; 26.07.2015	46.3 N, 141.8 E	09.01.2001
46.0 N, 141.9 E	19.12.1999; 01.05.2002; 26.07.2015	46.3 N, 141.9 E	09.01.2001
46.0 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002; 26.07.2015	46.3 N, 142.0 E	15.08.1999; 09.01.2001; 01.05.2002
46.1 N, 141.0 E	04.03.2007; 13.04.2011; 20.07.2015; 08.01.2018	46.4 N, 141.0 E	09.05.2007; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018
46.1 N, 141.1 E	09.05.2007; 19.03.2011; 26.07.2015; 14.01.2018	46.4 N, 141.1 E	09.05.2007; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018
46.1 N, 141.2 E	19.12.1999; 26.07.2015	46.4 N, 141.2 E	19.12.1999; 11.04.2001; 27.05.2015; 14.05.2018
46.1 N, 141.3 E	19.12.1999; 26.07.2015	46.4 N, 141.3 E	09.04.2001
46.1 N, 141.4 E	19.12.1999; 26.07.2015	46.4 N, 141.4 E	09.04.2001; 24.01.2004
46.1 N, 141.5 E	19.12.1999; 27.05.2015	46.4 N, 141.5 E	09.04.2001
46.1 N, 141.6 E	19.12.1999; 27.05.2015	46.4 N, 141.6 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 141.7 E	19.12.1999	46.4 N, 141.7 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 141.8 E	19.12.1999	46.4 N, 141.8 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 141.9 E	19.12.1999	46.4 N, 141.9 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.1 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002	46.4 N, 142.0 E	15.08.1999; 09.04.2001; 07.11.2002
46.2 N, 141.0 E	19.12.1999; 09.05.2007; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018	46.5 N, 141.0 E	09.05.2007; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018
46.2 N, 141.1 E	19.12.1999; 09.05.2007; 19.03.2011; 27.07.2015; 14.01.2018	46.5 N, 141.1 E	09.05.2007; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018
46.2 N, 141.2 E	19.12.1999; 26.07.2015	46.5 N, 141.2 E	19.12.1999; 11.04.2001; 14.05.2018
46.2 N, 141.3 E	19.12.1999; 26.07.2015	46.5 N, 141.3 E	09.04.2001
46.2 N, 141.4 E	19.12.1999; 11.04.2001; 26.07.2015	46.5 N, 141.4 E	09.04.2001
46.2 N, 141.5 E	19.12.1999; 11.04.2001	46.5 N, 141.5 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.6 E	19.12.1999	46.5 N, 141.6 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.7 E	19.12.1999	46.5 N, 141.7 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.8 E	19.12.1999	46.5 N, 141.8 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 141.9 E	19.12.1999	46.5 N, 141.9 E	15.08.1999; 09.04.2001
46.2 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002	46.5 N, 142.0 E	23.10.1999; 09.04.2001; 27.06.2001

то он на 325 дней меньше, чем тот же период, но отсчитываемый от τ_1 (T1). Отметим, что и в других группах периоды тревоги также существенно снижаются, если применять отсчет периода тревоги от τ_2 (табл. 4). С точки зрения физических основ метода тревогу следует объявлять уже после первых признаков появления аномалии (T1), однако во всех наших примерах не установлено ни одной реализации прогноза до момента, когда аномалии завершаются и па-

раметр возвращается к фоновым значениям. Соответственно, можно разделить уровни оповещения на два типа – красный (T2) и желтый (T1).

Результаты группируем по географическому принципу, но стараемся придерживаться естественного временного хода.

1. Аномалия зарегистрирована в пределах 49.5° N, 142.0° E (рис. 2) в феврале 2000 г. Очевидная и довольно быстрая реализация – Угле-

Таблица 4. Землетрясения с $M \geq 5$ в каталоге СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг. после декластеризации

Table 4. The earthquakes with $M \geq 5$ in the catalog of 1997–2019 of SB FRC UGS RAS after the declustering

№	Дата Время	M	°N	°E	Название землетрясения. Географическая позиция	P ₁₅	P ₁₀₀	ГК	У	Гр	T1, дни	T2, дни
1	04.08.2000	7	48.64	142.18	Углегорское	+	+	+	+	+	170	26
2	01.09.2001	5.2	47.3	142.66	Такойский рой	+	+	+	+	+	739	314
3	08.03.2005	5.1	52.26	141.79	Район мыса Погиби	+	+	+	+	+	299	239
4	12.06.2005	5.5	52.86	144.18	Пильгунское	+	+	+	+	+	389	329
5	17.08.2006	5.6	46.55	141.85	Горнозаводское	+	+	+	+	+	331	241
6	02.08.2007	6.2	46.83	141.81	Невельское	+	+	+	+	+	83	25
7	21.09.2007	5	47.26	142.76	Между Соколом и Такое	+	+	+	+	+	741	655
8	16.03.2010	5.4	52.19	142.41	Уангское	+	+	+	+	+	820	610
9	16.02.2010	5	49	141.34	В Татарском проливе 50 км на запад от Углегорска	+	+	+	+	+	425	240
10	23.06.2011	5	49.17	142.84	15 км к ЮЗ от Поронайска	+	+	+	+	+	951	773
11	12.10.2011	5.3	49.22	142.28	14 км на СВ от Шахтерска	+	+	+	+	+	1054	910
12	02.12.2011	5.2	48.84	141.88	28 км к югу от Углегорска (в проливе у с. Орлово)	+	+	+	+	+	1104	960
13	12.12.2011	5.6	50.63	143.1	Тымовское	+	+	+	+	+	1114	970
14	29.12.2011	5.1	48.92	142.22	20 км на ЮВ от Углегорска (Краснополье)	+	+	–	+	–	1131	953
15	21.10.2012	5	53.36	142.56	37 км к ЮЗ от Охи.	+	+	+	+	+	–	–
16	25.11.2013	5.1	45.88	141.79	26 км на ЮЗ от мыса Крильон	+	+	+	+	+	970	730
17	19.02.2014	5	52.18	142.58	Около пос. Ноглики	+	+	+	+	+	–	–
18	14.08.2016	5.8	50.32	142.49	Онорское	+	+	+	+	+	360	193
19	23.04.2017	5	46	142.05	Крильонское	+	+	+	+	+	632	602

Примечания. P₁₅ и P₁₀₀ – алгоритм Ризенберга [Reasenber, 1985] в двух вариантах, при r = 15 км и r = 100 км (r – interaction radius factor), ГК – алгоритм Гарднера–Кнопова [Gardner, Knopoff, 1974], У – алгоритм Урхаммера [Uhrhammer, 1986], Гр – алгоритм Грюнделя [Grünthal et al., 2009]. T1 и T2 – периоды тревоги, отсчитываемые, соответственно, от первой точки (τ_1) выхода параметра LURR из фоновых значений или от последней точки (τ_2) перед возвращением параметра LURR к фоновому уровню. Серым цветом выделены землетрясения, перед которыми аномалии зафиксированы не были.

Note. P₁₅ and P₁₀₀ is the Reasenber algorithm [Reasenber, 1985] in two variants when r = 15 km and r = 100 km (r – interaction radius factor), ГК – the Gardner-Knopoff algorithm [Gardner, Knopoff, 1974], У – the Uhrhammer algorithm [Uhrhammer, 1986], Гр – the Grünthal algorithm [Grünthal et al., 2009]. T1 and T2 – alarm periods counted, respectively, from the first point (τ_1) of the LURR parameter outside the background values or from the last point before the LURR parameter returns to the background level. The earthquakes, before which no anomalies have been recorded, are highlighted in gray.

горское землетрясение 4.08.2000, $M = 7$ (№ 1), эпицентр которого находится в области с аномалией LURR. Отметим, что это самое большое по величине магнитуды землетрясение в рассматриваемом периоде (табл. 4).

2. Разделенные формально по времени, но проявившиеся в 7 соседних областях аномалии на юге острова наблюдаются с августа 1999 по июнь 2001 г. (рис. 2 а). Зона тревоги в преде-

лах с 45.0° по 48.5° N. Реализацией стал Такойский рой 01.09.2001 (№ 2), максимальная магнитуда в котором составила $M = 5.2$, располагается точно в области тревоги.

3. Аномалия в июне 2001 г. на севере острова (рис. 2 а) обнаружена в одной расчетной зоне, принимается ложной тревогой (хотя здесь же в 2005 г. произошло землетрясение с $M = 5.1$). Основные причины – большой период тревоги

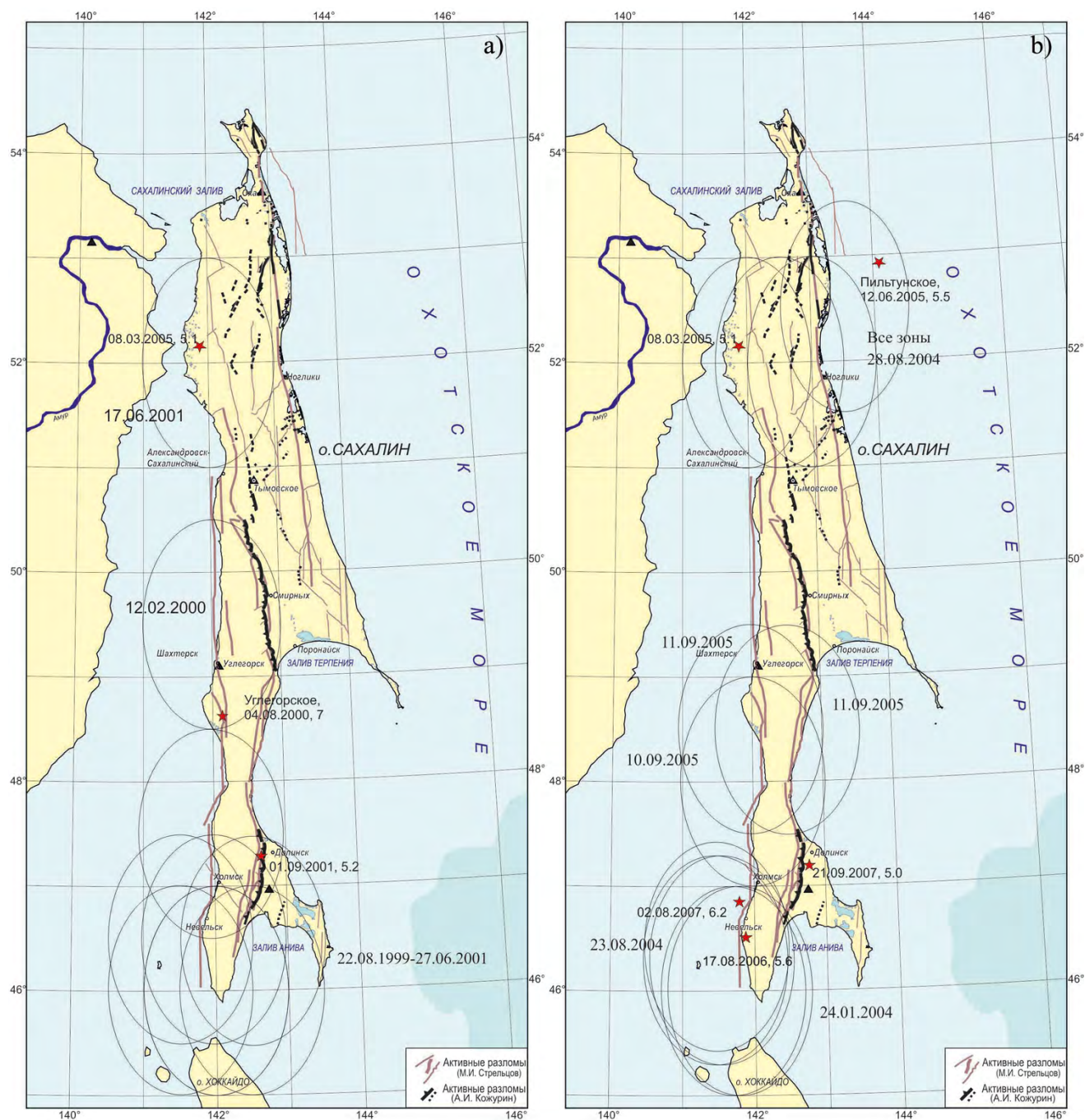


Рис. 2. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: (а) 1999–2001 гг., (б) 2004–2005 гг. Время появления аномалий в областях указано по τ_1 .

Figure 2. The anomalous areas (ellipses) and the earthquakes (asterisks) during the alarm periods: (a) 1999–2001, (b) 2004–2005. The anomalies occurrence time is indicated by τ_1 .

(больше трех лет, 1361 день), а также появление в этой и соседних зонах аномалий в августе 2004 г. Альтернатива решению о фиксации ложной тревоги – это продление прогноза (что часто практикуется у сейсмологов).

4. Аномальная зона в 2002 и 2003 гг. (рис. 3 а) представляет собой ложную тревогу.

5. Аномалии 2004 г. в 5 южных областях (получены при детализации выборок через 0.1°) являются предвестниками Горнозаводского землетрясения (рис. 2 б).

6. Четыре аномалии августа 2004 г. (рис. 2 б) являются прогнозом одновременно для двух землетрясений 2005 г. в северной части острова. Эти землетрясения (№ 3 и № 4) расположились внутри областей с аномалиями LURR.

7. Аномалия в сентябре 2005 г. фиксировалась в 3 очень близких областях (рис. 2 б). Землетрясения № 5, 6 и 7 могут быть прогнозными целями: отклонение от областей, в которых выделены аномалии, для первого 45 км, второго и третьего – около 15 км. Самый большой период тревоги – для землетрясения № 7 – составляет 741 день.

8. Аномалия фиксировалась в мае 2007 г. всего в 2 областях, очень близких друг к другу (рис. 5 а). Для Невельского землетрясения период тревоги стал самым коротким среди всех случаев – 83 дня.

9. В период с 2007 по 2009 г. аномальные зоны «захватили» практически весь остров (рис. 4 а). Первая зона тревоги включает 3 области на севере острова (52° N). Здесь аномалия впервые отмечена в декабре 2007 г., а через

820 дней в ней произошло Уангское землетрясение. Далее аномалии последовательно появлялись в центральной части Сахалина в ноябре–декабре 2008 г. и на юге от декабря 2008 до июня 2009 г. В отличие от обособленной зоны 2007 г., в 2008–2009 гг. территория, на которой фиксируется период тревоги, очень обширна (с 45.5° по 50.5° E). В качестве реализаций выступают землетрясения 2010–2011 гг., включая Тымовское, которое находится у верхней границы.

10. Аномалия 2010 г. в единственной зоне может являться предвестником 4 декабрьских землетрясений 2011 г. с периодами ожидания 533 и 560 дней (рис. 5 б), но на этой территории прогноз открыт по аномалии 2008 г., поэтому появление аномалии в 2010 г. не меняет период ожидания. В то же время эта аномальная зона может быть уточняющей для прогноза 2008–2009 гг. по центральной части острова, так как все реализации данного прогноза оказались близки именно к этой области (рис. 4 а).

11. Аномалия 2011 г. в одной области с периодом тревоги 970 дней (2 года 8 мес.) для землетрясения № 16 (рис. 5 б).

12. В 2014 и 2015–2016 гг. выделены два тревожных периода (рис. 4 б), первый из которых представляет собой ложную тревогу, а второй является прогнозом для Онорского (№ 18) и Крильонского (№ 19) землетрясений.

13. На рис. 3 б показана ложная тревога, объединяющая 8 соседних аномалий в конце 2016 г.

Аномалии 2018 г. не рассматриваются в данной работе, так как даже по средним

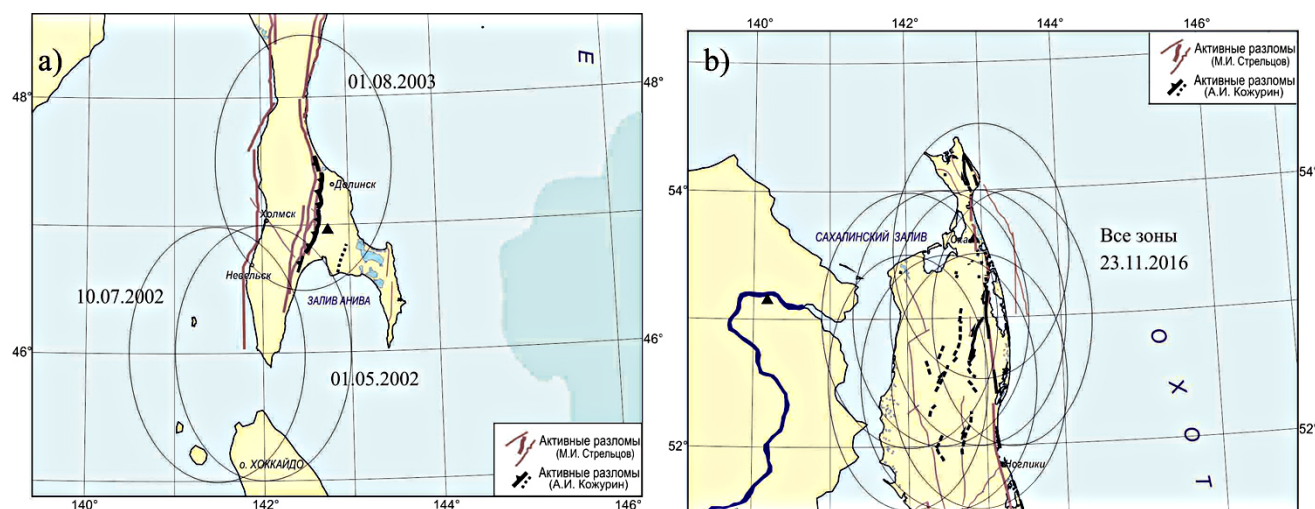


Рис. 3. Аномальные зоны (показаны эллипсами) в периоды тревоги: (а) 2002–2003 гг., (б) 2016 г. Время появления аномалий в областях указано по τ_1 .

Figure 3. The anomalous areas (ellipses) during the alarm periods: (a) 2002–2003, (b) 2016. The anomalies occurrence time is indicated by τ_1 .

LURR успевают вернуться к фоновым значениям, можно при расчете периода тревоги брать последнюю точку перед возвращением в фон (τ_2). При этом не только снижается время ожидания (табл. 4, T2), но и сближаются времена фиксации аномальных областей. Так, по первым точкам аномалии были зафиксированы на юге с августа 1999 по июнь 2001 г. (23 мес.), а по последним – с октября 2000 по июль 2001 (10 мес.). Улучшается ситуация по сближению времен аномалий и в 2009 и 2016 гг. (рис. 4, 6). Например, в центральной и южной части острова по первым точкам аномалии были зафиксированы с октября 2008 по июнь 2009 (9 мес.), а по последним – с апреля по сентябрь 2009 г. (6 мес.).

Для понимания, как могла бы работать методика в реальном времени, можно отыграть пробный ретроспективный сценарий. Итак, с апреля по ноябрь в 2014 г. появляются аномалии на севере (рис. 4), при этом открывается период тревоги до апреля 2017 г. (на 3 года). Далее с июля 2015 по июнь 2016 г. открываются области с юга до центральной части с периодом тревоги до июля 2018 г. Фактически, с июля 2015 по апрель 2017 весь остров находится в зоне тревоги. Можно согласиться, что почти два года тревоги на такой обширной тер-

ритории это много, однако 14.08.2016 произошло Оморское землетрясение с $M = 5.8$, которое за 22 года стало третьим по силе из 19 землетрясений в списке. Спустя 7 мес. в данном тревожном периоде произошло Крильонское землетрясение с $M = 5$. Получается, что в случае прогноза для больших территорий при появлении одного землетрясения тревогу снимать не следует, а стоит продолжить наблюдение.

Для статистической оценки результатов известными методами, такими как, например, диаграмма ошибок [Molchan, 1991] или эффективность по А.А. Гусеву [Гусев, 1974], основной проблемой была и остается неопределенность прогнозного параметра – периода ожидания, который в большинстве случаев небольшой (табл. 4). Однако его увеличение до максимальных значений (землетрясения № 10–14) приводит к тому, что многие периоды пересекаются друг с другом. Заметим, что именно от этого значения (длительность тревоги) зависит количество ложных тревог и пропущенных целей. Даже вопрос широкого диапазона энергетического прогнозного параметра – магнитуды (а она устанавливается от пяти) решается просто, на основе известной информации по потенциалу основных генерирующих зон и законов повторяемости землетрясений.

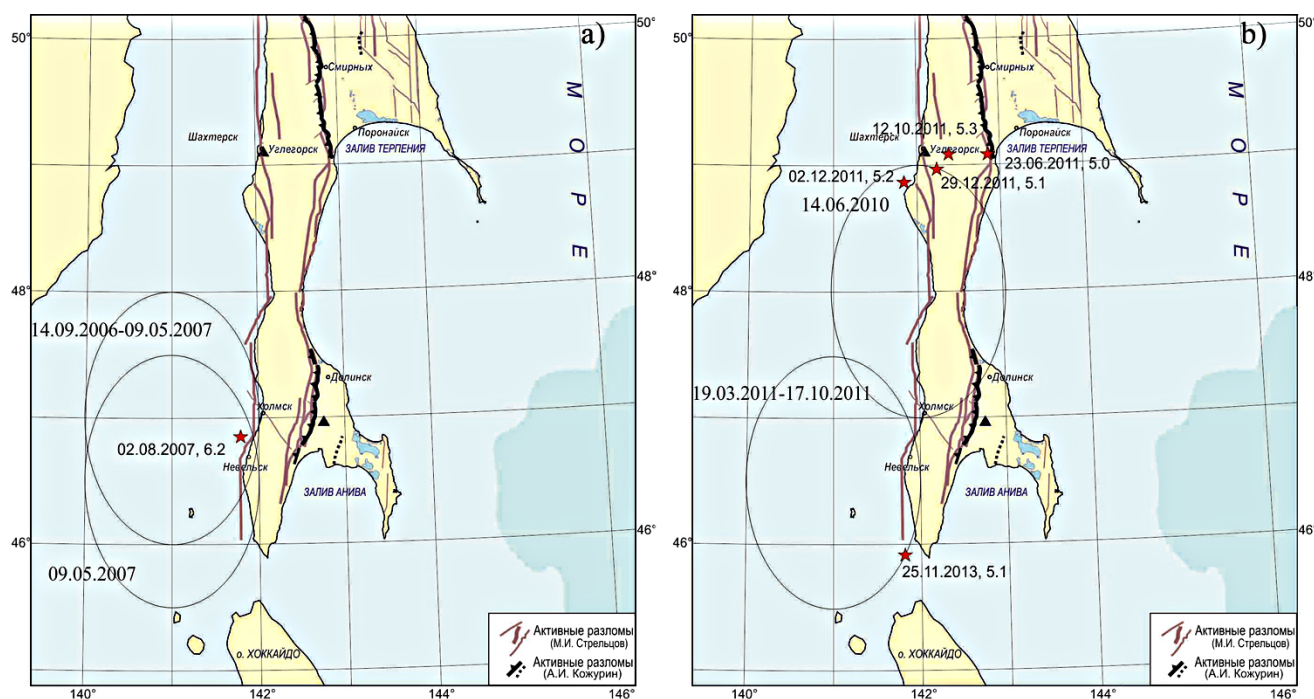


Рис. 5. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: (а) 2007 г., (б) 2010–2011 гг. Время появления аномалий в областях указано по τ_1 .

Figure 5. The anomalous areas (ellipses) and the earthquakes (asterisks) during the alarm periods: (a) 2007, (b) 2010–2011. The anomalies occurrence time is indicated by τ_1 .

Попробуем оценить эффективность прогнозов методом LURR на простейшем для прогнозной тематики уровне – захвата, пропуска цели и ложных тревог. На рис. 7 а показаны землетрясения из табл. 4, причем красным цветом отмечены 17 землетрясений, попавших в области прогноза по пространству и времени, а черным – пропущенные. На карте видно, что в соответствии с табл. 1 области, которые при-

годны для расчетов, являются основными зонами генерации сильных землетрясений. Можно разделить их по географическому принципу – северная ($51\text{--}54^\circ \text{ N}$), центральная ($48\text{--}51^\circ \text{ N}$) и южная ($46\text{--}48^\circ \text{ N}$). Северная и центральная зоны имеют между собой разрыв по расчетным областям на $50\text{--}51.5^\circ \text{ N}$. Южная зона с центральной зоной пересекаются, так как расчетные области распределены непрерывно.

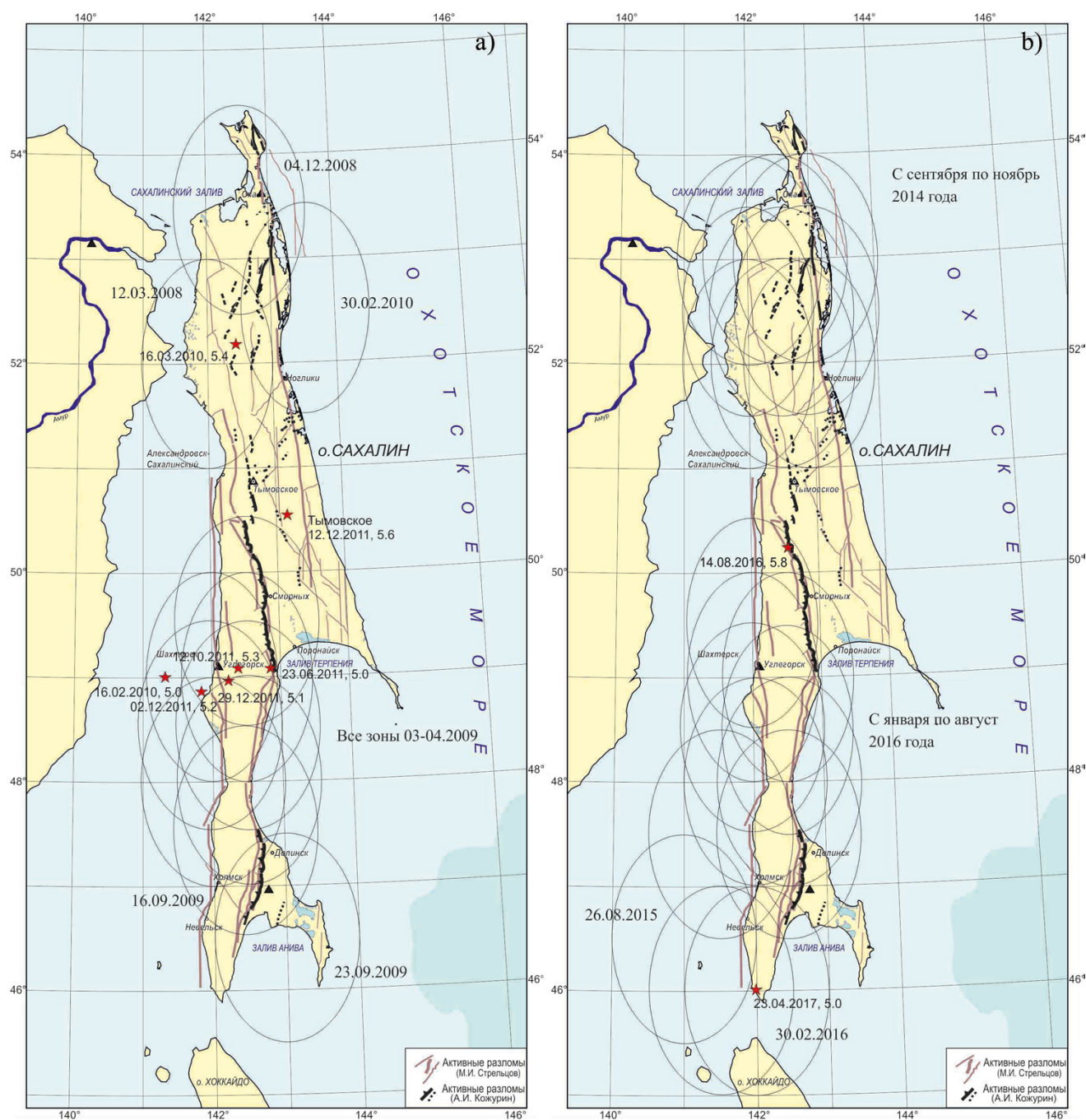


Рис. 6. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: (а) 2008–2009 гг., (б) 2014–2016 гг. Время появления аномалий в областях указано по τ_2 .

Figure 6. The anomalous areas (ellipses) and the earthquakes (asterisks) during the alarm periods: (a) 2008–2009, (b) 2014–2016. The anomalies occurrence time is indicated by τ_2 .

Разберем подробно результаты по центральной зоне. Здесь периоды тревоги открываются в среднем каждые 5 лет, т.е. 4 периода тревоги – в 2000 (июль), 2005 (сентябрь), 2009 (март) и в 2016 (январь) году. В отличие от первого случая в 2000 г., когда тревожный период открывался исключительно в одной области центральной зоны, в остальных периоды открывались одновременно и в южной

зоне. Землетрясения с $M \geq 5$ в центральной зоне происходили в августе 2000 (Углегорское), с 2010 по 2011 (6 землетрясений, включая Тымовское) и в августе 2016 г. (Онорское). В южной части острова в 2006 г. произошло Горнозаводское землетрясение, которое явилось реализацией тревожного периода 2005 г. Все землетрясения произошли в областях, где отмечались аномалии, а периоды тревоги

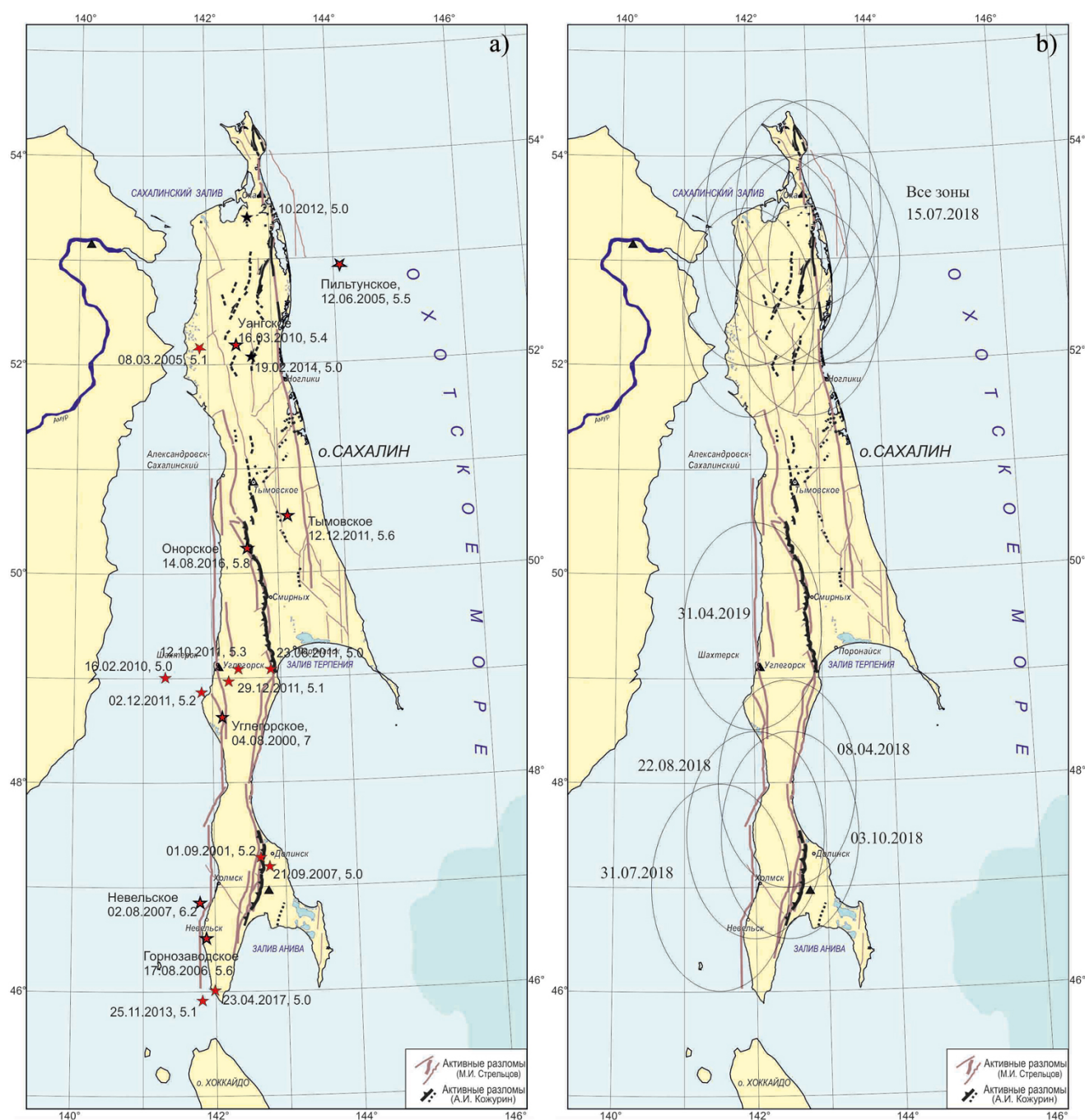


Рис. 7. Землетрясения из табл. 4 (а) и аномальные области 2018–2019 гг. (б). Время появления аномалий в областях указано по τ_2 .

Figure 7. The earthquakes from the Table 4 (а) and the anomalous areas of 2018–2019 (б). The anomalies occurrence time is indicated by τ_2 .

не превышали 3 лет. Можно сказать, стопроцентная реализация. Но это один из лучших примеров, в других зонах имеются и пропущенные цели, и ложные тревоги, поэтому общая статистика смотрится хуже. Так, по представленным результатам с 1997 по 2019 г., 17 землетрясений из 19 (с $M \geq 5$) оказались в зонах с аномалиями в периоды тревоги не более 3 лет; две цели пропущены. Из 15 периодов тревоги 4 оказались ложными. То есть 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений.

Обсуждение результатов завершим картой (рис. 7 б) областей аномальных значений LURR в 2018 и 2019 гг.

Ситуация 2018–2019 гг. близка к схеме, которая реализовывалась в периоды 2009 и 2016 гг., когда многочисленные области с аномалиями появлялись во всех генерирующих зонах острова. Тогда периоды тревоги заканчивались умеренными землетрясениями в 2010, 2011, 2016 и 2017 гг., причем определить, какая зона должна отработать первой, невозможно.

Можно лишь предположить вероятность землетрясения в 2021–2022 гг. в центральной части острова. Это может быть событие на территории Западно-Сахалинской шельфовой зоны (по модели ИМГиГ-2007 Углегорско-Александровская зона), причем, вероятнее всего, в районе от 49 до 50° N, так как выше по широте зона разгружалась в 2011 (Тымовское) и в 2016 (Онорское) годах. Потенциал этой зоны позволяет генерировать землетрясение $M \sim 7$ с периодичностью 230 лет, однако стоит учесть, что последнее Углегорское землетрясение 2000 г. имело магнитуду близкую к максимальным оценкам (а предыдущее Лесогорско-Углегорское землетрясение с такой же магнитудой было в 1924 г.). Значит, на прогнозный период возможны лишь умеренные магнитуды до 6. На юге в этот период землетрясение вероятно в Южно-Сахалинске или Долинском районе (по модели ИМГиГ-2007 Быковско-Анивская зона). Для этой сейсмогенерирующей зоны возможны землетрясения с магнитудой 7, но с периодом повторяемости порядка 600 лет. Впрочем, современный период наблюдений не имеет примеров генерации там сильных землетрясений (максимальная магнитуда 5.5 у Анивского землетрясения в 1951 г.). Север Сахалина менее предсказуем,

ведь именно там больше всего пропущенных землетрясений и ложных тревог. Однако именно с учетом ложной тревоги в конце 2016 г. здесь также существует вероятность реализации в 2021–2022 гг. прогноза с магнитудой до 6.

Предложенное обоснование метода LURR остается на качественном уровне. Однако полученные результаты для о. Сахалин позволяют считать его эмпирически надежным, особенно в ключе практической реализации двух прогнозов, предложенных в реальном времени (по Онорскому и Крильонскому землетрясениям).

Заключение

В данной работе на примере о. Сахалин продемонстрирован подход, который может быть использован при прогнозе землетрясений методом LURR в режиме реального времени. Рассмотрены вопросы подготовки каталогов, выбора параметров для расчетов, правил выделения аномалий и определения тревожных периодов. На основе предложенного подхода (алгоритма) проведен анализ землетрясений на о. Сахалин с 1997 по 2019 г., в результате которого 17 землетрясений из 19 (с $M \geq 5$) оказались в зонах с аномалиями в периоды тревоги не более 3 лет. Из 15 таких периодов лишь 4 оказались ложными. Таким образом, 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений.

Кроме того, по результатам данной работы на территории о. Сахалин выявлены многочисленные аномалии в 2018–2019 гг., которые указывают на высокую вероятность появления землетрясений умеренных магнитуд (с $M \geq 5$) в ближайшие два года. Такая вероятность существует для всех основных зон генерации на Сахалине, так как аномалии зафиксированы в большинстве расчетных областей. Это третий по счету случай (после 2008–2009 и 2015–2016 гг.), когда точные прогнозы по месту будущего события, а также их количеству невозможны ввиду одновременного появления аномалий в нескольких сейсмогенерирующих зонах.

Методика и результаты данной работы могут служить практическими рекомендациями для работы с методом LURR специалистам сейсмологам о. Сахалин и, возможно, других сейсмоопасных регионов.

Список литературы

1. Гусев А.А. **1974**. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. В кн.: *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке*. Новосибирск: Наука, 109–119.
2. Закупин А.С. **2016**. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса. *Геоинформатика*, 1: 34–43.
3. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2020**. Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 160–177. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177>
4. Закупин А.С., Семенова Е.П. **2018**. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ($M_w > 5$) на Сахалине методом LURR. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 5: 83–98. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
5. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018**. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Оморского землетрясения на Сахалине ($M_w = 5.8$, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика*, 11: 1904–1911. <https://doi.org/10.15372/gig20181112>
6. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. **2020**. Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, 1: 66–78. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
7. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин. *Тихоокеанская геология*, 2012, 31(5): 93–103.
8. Поплавская Л.Н. (ред.). **2006**. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Авторы: Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С., Нагорных Т.В., Пермикин Ю.Ю., Поплавский А.А., Фокина Т.А., Ким Ч.У., Краева Н.В., Рудик М.И. и др. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
9. Раутиан Т.Г. **1960а**. Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений. *Труды Таджикского института сейсмостойкого строительства и сейсмологии*, 7: 41–86.
10. Раутиан Т.Г. **1960б**. Энергия землетрясений. *Труды ИФЗ АН СССР*, 176(9): 75–114.
11. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967**. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–23.
12. Сохатюк А.С., Децик И.В., Богинская Н.В., Паршина И.А., Ферчева В.Н. **2016**. Сахалин ($M \geq 2.8$). *Землетрясения России в 2014 г.* Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 127–131.
13. Gardner J.K., Knopoff L. **1974**. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. of the Seismological Society of America*, 64(5): 1363–1367.
14. Grünthal G., Wahlström R., Stromeyer D. **2009**. The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) – updated and expanded to the last millennium. *J. of Seismology*, 13(4): 517–541. <https://doi.org/10.1007/s10950-008-9144-9>
15. Molchan G. **1991**. Structure of optimal strategies in earthquake prediction. *Tectonophysics*, 193: 267–276.
16. Reasenber P. **1985**. Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *J. of Geophysical Research*, 90(3–18): 5479–5495.
17. Stepanov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottemöller L. **2014**. New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data. *Seismic Instruments*, 1(50): 67–74. <https://doi.org/10.3103/s0747923914010083>
18. Uhrhammer R. **1986**. Characteristics of Northern and Central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1): 21.
19. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001**. Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157(11/12): 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29
20. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006**. LURR's twenty years and its perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>

References

1. Gusev A.A. **1974**. [Earthquakes prediction by the seismicity statistics]. In: *Seismichnost' i seismicheskii prognoz, svoistva verkhnei mantii i ikh svyaz' s vulkanizmom na Kamchatke* [Seismicity and seismic prediction, properties of the upper mantle and their relation to volcanism in Kamchatka]. Novosibirsk: Nauka, 109–119. (In Russ.).
2. Zakupin A.S. **2016**. Program complex for the analysis of instability of seismic process. *Geoinformatika*, 1: 34–43. (In Russ.).

3. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2020**. Mid-term assessments of the seismic hazard on Sakhalin Island by the LURR method: new results. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 160–177. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.160-168.169-177>
4. Zakupin A.S., Semenova E.P. **2018**. Study of the process of preparation of strong earthquakes ($M_w > 5$) on Sakhalin using the LURR method. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 5: 83–98. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
5. Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. **2018**. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor ($M = 5.8$) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*, 59(11): 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012>
6. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2020**. Using the Load/Unload Response Ratio and Self-Developing Processes Methods of analyzing seismic sequences to predict earthquakes in Sakhalin. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 56(7): 693–705. <https://doi.org/10.1134/S0001433820070105>
7. Levin B.W., Kim C.U., Solovjev V.N. **2013**. A seismic hazard assessment and the results of detailed seismic zoning for urban territories of Sakhalin Island. *Russian J. of Pacific Geology*, 7(6): 455–464.
8. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. [Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005]. Authors: Poplavskaya L.N., Ivashchenko A.I., Oskorbin L.S., Nagornykh T.V., Permikin Yu.Yu., Poplavskii A.A., Fokina T.A., Kim Ch.U., Kraeva N.V., Rudik M.I. et al. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
9. Rautian T.G. **1960a**. Zatluchaniye seysmicheskikh voln i energiya zemletryaseniya [Seismic waves attenuation and earthquakes energy]. *Trudy Tadzhikskogo instituta seysmostoykogo stroitel'stva i seysmologii [Proceedings of the Tajik Institute of Earthquake Engineering and Seismology]*, 7: 41–86.
10. Rautian T.G. **1960b**. [The energy of earthquakes]. *Trudy IFZ AN SSSR [Proceedings of the IPE, the USSR Academy of Sciences]*, 176: 75–114. (In Russ.).
11. Solov'yev S.L., Solov'yeva O.N. **1967**. [The relationship between the energy class and magnitude of Kuril earthquakes]. *Izvestiya RAN, Fizika Zemli*, 2: 13–23.
12. Sokhatyuk A.S., Detsik I.V., Boginskaya N.V., Parshina I.A., Fercheva V.N. **2016**. Sakhalin ($M \geq 2.8$). *Zemletryaseniya Rossii v 2014 g. [Earthquakes in Russia in 2014]*. Obninsk: FITs EGS RAN, 127–131.
13. Gardner J.K., Knopoff L. **1974**. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. of the Seismological Society of America*, 64(5): 1363–1367.
14. Grünthal G., Wahlström R., Stromeyer D. **2009**. The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) – updated and expanded to the last millennium. *J. of Seismology*, 13(4): 517–541. <https://doi.org/10.1007/s10950-008-9144-9>
15. Molchan G. **1991**. Structure of optimal strategies in earthquake prediction. *Tectonophysics*, 193: 267–276.
16. Reasenbergs P. **1985**. Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *J. of Geophysical Research*, 90(3–18): 5479–5495.
17. Stepanov A.A., Gavrilov A.V., Kononov A.V., Ottemöller L. **2014**. New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data. *Seismic Instruments*, 1(50): 67–74. <https://doi.org/10.3103/s0747923914010083>
18. Uhrhammer R. **1986**. Characteristics of Northern and Central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1): 21.
19. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001**. Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157(11/12): 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29
20. Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. **2006**. LURR's twenty years and its perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2317–2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>

Об авторах

ЗАКУПИН Александр Сергеевич (ORCID 0000-0003-0593-6417), кандидат физико-математических наук, зам. директора, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.zakupin@imgg.ru

БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, fily77@mail.ru

About the Authors

ZAKUPIN Alexander S. (ORCID 0000-0003-0593-6417), Cand. of Sci. (Phys. and Math.), Deputy Director, Leading Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.zakupin@imgg.ru

BOGINSKAYA Nataliya V. (ORCID 0000-0002-3126-5138), Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, fily77@mail.ru