

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

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 расчеты приведены к единой базе сейсмологических данных (каталогу) Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Проведены новые расчеты, при этом настройки обработки и методики по интерпретации результатов полностью сохранены. На территории острова обработаны 119 расчетных выборок, 36 из которых оказались применимы для ретроспективного прогноза. 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 трех лет. Из 15 периодов 4 оказались ложными, т.е. 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений.

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

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

Aleksander 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 (catalog) of Sakhalin branch of the FRC “United Geophysical Survey of RAS”. New computations have been carried out, while the processing settings and methods of the results interpretation are completely preserved. 119 computational samples were processed on the territory of the island, 36 of which were found to be appropriate for a retrospective forecast. 15 alarm periods were obtained, which geographically represent all zones of moderate and strong earthquakes generation on Sakhalin. As a result, 17 out of 19 earthquakes with $M \geq 5$ were in the areas with anomalies during the alarm periods not exceeding three years. Of the 15 periods 4 turned to be false, i.e. 75 % of the alarms predicted 89 % of the earthquakes.

Keywords: seismicity, seismic events, LURR method, earthquakes catalog, anomaly

For citation: A.S. Zakupin, N.V. Boginskaya. 2021. Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin: a summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*. Article first published online 20 Jan 2021. *PREPRINTS.RU*. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112169>

Для цитирования: А.С. Закупин, Н.В. Богинская. 2021. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*. Статья впервые опубликована online 20 января 2021. *PREPRINTS.RU*. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112169>

Введение

В последние несколько лет сотрудниками Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) получены интересные результаты в области среднесрочных прогнозов землетрясений на Сахалине методом LURR [Yin et al., 2001]. Так, за период с 1988 по 2019 г. было выявлено семь зон тревоги с обнаруженными аномалиями, в которых затем (в сроки, не превышающие 2 лет) происходили сильные землетрясения. Примечательно, что часть прогнозов была сделана в реальном времени [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018]. Два последних землетрясения (Онорское, 2016; Крильонское, 2017) из семи являлись реализациями прогнозов, которые рассматривались на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (протокол № 3 от 11.05.2016 г., протокол № 2 от 16.03.2017 г.). Оба прогноза были признаны реализованными с небольшими (не более 50 км) отклонениями по месту очага и полностью соответствующими наблюдаемым значениям по времени и магнитуде [Закупин и др., 2018; Закупин и др., 2020].

Авторы разработали методики по использованию алгоритма LURR, которые отличались универсальностью в выборе параметров обработки, что обеспечивает возможность повторения полученных результатов и невозможности 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 выборки (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 весьма убедительные результаты [Закупин и др., 2018]. Нужно отметить, что для определения универсальных параметров потребовалось подготовить и рассчитать несколько сотен вариантов расчетных выборок (комбинаций 5 параметров) в ручном режиме.

Однако даже такие результаты вполне обоснованно подверглись критике. Первый вопрос был связан с достоверностью сейсмологических данных. Дело в том, что в разные периоды времени ретроспективный анализ проводился 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 на каталоге под ред. Л.Н. Поплавской [Поплавская (ред.), 2006] для территории выше 52° с.ш. Основная цель была изучить 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 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 [Фокина и др., 2003]. С помощью этого каталога выявлена зона тревоги для Крильонского землетрясения (2017 г., $M = 5.0$).

Такое разнообразие первичных данных, безусловно, вызывало сомнение в достоверности результатов, а также универсальности методики. К тому же то, что Углегорское землетрясение (2000 г., $M = 7$), считавшееся пропущенным, в 2020 г. оказалось ретроспективно прогнозируемым (рассчитано по данным 2 каталогов), усилило эти сомнения.

Второй аспект критики наших результатов касается магнитуды проверяемого (прогнозируемого) землетрясения. Верхний предел ожидаемого события определялся по сейсмотектоническим моделям с зонами возможных очагов землетрясений (ВОЗ) [Левин и др., 2013]. С нижним пределом не все было очевидно. Казалось бы, если рабочая выборка имеет верхней границей $M = 5$, тогда и следует прогнозировать землетрясения с $M \geq 5$ или более. Но, с учетом того, что все наши зоны тревог были получены для сильных землетрясений с $M > 5.5$, то нижний предел прогноза магнитуды мы определили в 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 магнитудой 5, стало ясно, что вместо удачно реализованного прогноза должна была быть определена ложная тревога. Значит, нижний порог ожидания можно обоснованно увязать с верхней границей рабочей выборки и считать его $M = 5$.

В качестве третьего и четвертого компонента критики рекомендовалось проводить расчеты на всей территории острова, с убедительным количеством выборок, и определить порог отсека аномалий (уровень дискриминации на графиках распределения параметра). Порог отсека аномалий можно не просто определить 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. В своих работах китайские коллеги не стеснялись писать – в течение нескольких лет, а мы на основе ретроспективного анализа ранее остановились на двух годах. В данной работе целесообразно не акцентировать на этом внимание (работа все равно ретроспективная), а на основе полученных результатов зафиксировать реальные значения постфактум.

В настоящее время мы используем единый каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, который признан научным сообществом в России (все магнитуды в нашей работе приведены в соответствии с ним), а потому есть необходимость на его базе перепроверить все полученные результаты. В расчетах, которые в данной работе проведены для о. Сахалин, мы опирались на данный каталог, который СФ ФИЦ ЕГС РАН непрерывно формирует с 1997 г., он пополняется по настоящее время в виде ежегодных выпусков (например, [Фокина и др., 2003]). Новые данные не исключают корректировок ранее полученных результатов, однако они уже заняли место в своей истории, а прогресс, который, как правило, и основывается на здоровой и рациональной критике, неумолим. Эту работу можно было бы считать обзором, ведь анализируется и переосмысливается шестилетний период работ, проведенных группой ученых-сейсмологов на о. Сахалин. Однако обилие первичных данных расчетов в виде карт и таблиц делает ее похожей на отчет, а устранение важных недостатков подхода означает перезагрузку и выход на новый уровень практики сейсмологических прогнозов. В любом случае все это позволяет надеяться на понимание нашей искренности и желания получить хороший инструмент, а не попыток достичь «нужного» результата.

Каталоги землетрясений на территории о. Сахалин для оценки сейсмичности составлялись специалистами ИМГиГ ДВО РАН и СФ ФИЦ ЕГС РАН.

До недавнего времени использовались два каталога сейсмических событий, которые содержат сведения о таких параметрах произошедших землетрясений, как дата, время, координаты событий и их глубина, а также энергетические показатели. Каталог землетрясений о. Сахалин, составленный группой авторов под руководством Л.Н. Поплавской (ИМГиГ ДВО РАН) [Поплавская (ред.), 2006] (далее Региональный каталог), содержит сведения о более чем 3500 событий с $M \geq 3.0$ в период с 1905 по 2005 г., т.е. практически с начала зарождения инструментальных наблюдений. 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. Полнота этой информации зависит от плотности сети сейсмостанций и чувствительности регистрирующей аппаратуры, т.е. критериев, меняющихся во времени. До 2010 г. сеть сейсмических станций Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН использовала аналоговую аппаратуру для регистрации сейсмических событий, но уже к концу 2010 г. окончательно перешла на цифровую регистрацию, существенно расширив аппаратное оснащение сейсмических станций. Вместе с этим переходом совершенствовались методы обработки инструментальных наблюдений, расширился их объем. Периодические данные для каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН выпускаются в сборнике «Землетрясения Северной Евразии». Издание содержит сведения о землетрясениях всех регионов Северной Евразии с параметрами гипоцентров, магнитудами, энергетическими классами, механизмами очагов по инструментальным наблюдениям и макросейсмические данные (например, [Фокина и др., 2003]).

Прежде чем говорить о различиях представленных каталогов, надо сказать о подходах к энергетической оценке величины землетрясений, принятой еще в СССР.

В практике сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке РФ для оценки величины землетрясений применяются разные магнитудно-энергетические шкалы [Бобков и др., 1989]: локальная магнитуда M_L , концепция которой создана Рихтером [Richter, 1958], магнитуды M_{SH} , M_{PV} , M_{PH} , M_{LV} , M_{LN} и энергетические классы K_s [Соловьев, Соловьева, 1967] и K_r [Раутиан, 1960]. Магнитуды M_{LV} и M_{LN} определяют по максимуму отношения полной составляющей амплитуды (A) к ее периоду (T) A/T в максимальной фазе поверхностной волны на записях вертикальной (V) и горизонтальной (H) компонент низкочастотной аппаратуры СК или СКД. M_{PV} и M_{PH} определяют по отношению A/T в максимуме продольной волны аппаратурой СК, СКД, а магнитуду $M_{PV}(A)$ – той же величиной A/T , но по записям короткопериодной аппаратуры СКМ. Значение магнитуды M_{SH} определяют по записям в максимуме поперечных (S) волн. Для землетрясений с глубиной гипоцентра более 80 км используется магнитуда $M_{SH}(A)$, для неглубокофокусных землетрясений – энергетические классы, определяемые по отношению A/T в максимальной фазе S -волн, записанных короткопериодной аппаратурой типа СКМ или ВЭГИК [Кондорская и др., 1982]. На рис. 1 показана схема используемых типов аппаратуры и сейсмических волн для определения магнитуд и энергетических классов землетрясений Дальнего Востока РФ до 2010 г.

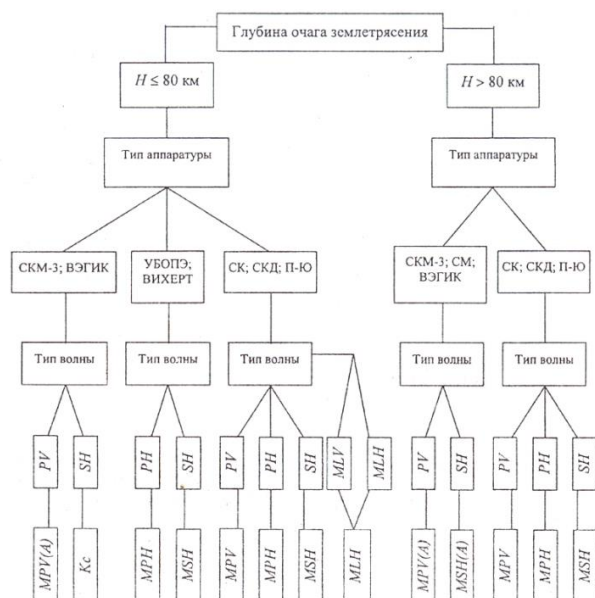


Рис. 1. Схема используемых типов аппаратуры и сейсмических волн для определения магнитуд и энергетических классов землетрясений Дальнего Востока РФ [Бобков и др., 1989].

В качестве региональных шкал для оценки энергетической величины коровых землетрясений о. Сахалин чаще используют шкалы ML, MLH, энергетический класс Kc [Соловьев, Соловьева, 1967] и Kp [Раутиан, 1960]. Смысл величины энергетического класса землетрясений K определен как логарифм энергии землетрясения $K = \lg E$ (Дж) [Раутиан, 1960]. На практике сейсмическую энергию землетрясений обычно определяют по специальным номограммам [Федотов, 1963], используя такие параметры записей землетрясений, как $A_{\max}$ – максимум отношения полной горизонтальной составляющей амплитуды в волне S, $A/T_{\max}$ – максимум отношения полной горизонтальной составляющей амплитуды в волне S к ее периоду и $S-P$ – разность времен прихода P- и S-волн на сейсмическую станцию. Как правило, сейсмическая энергия определяется по энергии S-волн, так как считается, что S-волны переносят бóльшую часть сейсмической энергии, чем P-волны [Федотов, 1963].

Определение энергетического класса для землетрясений Сахалина и Курильских островов проводится по номограмме, построенной для землетрясений данного региона, по отношению A/T в максимальной фазе S-волн, эпицентральному расстоянию и номограмме определения K по волнам PV и PH [Соловьев, Соловьева, 1967]. Номограмма рассчитана для землетрясений с глубиной очага 40 км и эпицентральных расстояний 40–700 км. Ввиду отсутствия номограмм для близких землетрясений Сахалина для эпицентральных расстояний $\Delta < 40$ км была принята формула, которая представляла изолинии номограммы аппроксимирующей формулой [Краева, 1997]:

$$Kc \approx 1.944 \log(A/T)_s + 3.836 \log(t_s - t_p) + 3.70, \quad (1)$$

где $(A/T)_s$ – максимальная колебательная скорость в волне S, а $t_s - t_p$ – это разница времени прихода волн.

Также для оценки энергетической величины местных землетрясений используется локальная магнитуда ML. Оценка магнитуды местных землетрясений на о. Сахалин проводится с использованием эмпирической номограммы, приведенной к энергетическому классу по Т.Г. Раутиан, Кр. Данная шкала не имеет принципиальных отличий от локальной магнитуды Рихтера, и связь между ними имеет вид $Kp = 1.8ML + 4$ [Коновалов, 2014]. Энергетический класс

Кс, так же как и энергетический класс Кр, не имеют принципиальных отличий от локальной магнитуды Рихтера и определяются, как показано выше, по амплитуде поперечной волны на записях короткопериодной аппаратуры (СКМ).

Унификация Регионального каталога была осуществлена по магнитуде MLH, приведенной к моментной магнитуде Mw, которая связана с сейсмическим моментом очага M₀ и определяется по записям объемных и поверхностных волн с периодами около 100 с [Hanks, Ramanogi, 1979]. Авторы получили аналитические выражения для аппроксимации данных для неглубокофокусных землетрясений:

$$\text{для } MLH \leq 6.5: M_w = 0.7 MLH + 1.9, \quad (2)$$

$$\text{для } MLH \geq 6.5: M_w = 0.044(MLH)^3 - 0.69(MLH)^2 + 4.22MLH - 3.9. \quad (3)$$

В случае глубокофокусных землетрясений, кроме уравнения связи MLH с другими магнитудными шкалами, авторы Регионального каталога учитывали влияние глубин очагов [Поплавская (ред.), 2006].

Для расчетов по методу LURR необходимы длинные ряды сейсмологических сводок в широком магнитудном диапазоне. Учитывая, что каталоги СФ ФИЦ ЕГС РАН имеют большое количество разных магнитудно-энергетических шкал, встала острая необходимость проведения систематизации и унификации каталогов по энергетическому значению. Для единой классификации событий по каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН за период 1997–2019 гг. авторы данного исследования пересчитали значения энергетических классов Кс и Кр неглубокофокусных землетрясений о. Сахалин в локальную магнитуду ML по формулам [Раутиан, 1960] и [Соловьев, Соловьева, 1967]:

$$ML = (K_p - 4)/1.8, \quad (4)$$

$$ML = (K_s - 1.2)/2. \quad (5)$$

Так как авторам для дальнейшего исследования не было необходимости использовать глубокофокусные землетрясения, то пересчет магнитуд для них не проводился, глубокие сейсмические события имеют ту магнитуду (MSH или MSH(A)), какая представлена в изначальном каталоге СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Сравнив результаты унификации двух каталогов по магнитудным шкалам, авторы выявили значимые различия в каталогах. Они заключаются не только в количестве зафиксированных сейсмических событий (для сравнения Региональный каталог [Поплавская (ред.), 2006] за 2003 год содержит 84 землетрясения, а каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН [Фокина и др., 2003] – 193), но и в их энергетической оценке (табл. 1).

Таблица 1. Пример результатов пересчета магнитуды MLH в магнитуду Mw для Регионального каталога и пересчета с энергетических классов Кс и Кр в магнитуду ML для каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН

Дата землетрясения	Время землетрясения, ч-мин-с		Глубина, км		Магнитуда	
	РК	КСФ	РК	КСФ	РК, Mw	КСФ, ML
08.01.2003	10-19-05.6	10-19-05.6	7	7	3.2	3.0
16.01.2003	03-39-04.4	03-39-04.4	11	11	3.7	3.5
14.02.2003	09-51-39.5	09-51-39.5	13	13	3.6	3.4
18.12.2003	23-35-19.0	23-35-19.0	11	11	3.2	3.0
03.01.2004	18-01- 35.0	18-01- 35.9	10	10	3.5	3.1
06.01.2004	22-41- 22.6	22-41- 22.1	10	10	3.4	3.0
25.01.2004	03-23-05.7	03-23-05.7	12	12	3.6	3.4

15.02.2004	09-23-24.5	09-23-26.8	10	5	2.8	3.0
24.02.2004	17-09-13.6	17-09-13.6	9	9	3.6	3.4

Примечание. РК – Региональный каталог, КСФ – каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Использование каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН в расчетных выборках, необходимых в работе с методом LURR, дает возможность включать большее количество землетрясений с $M \geq 3.3$ (нижний порог в расчетной выборке), что позволяет обработать больше расчетных областей. Главный же аспект в том, что каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН ежегодно непрерывно пополняется путем периодических изданий и позволяет применять данные, обладающие преемственностью в плане подготовки и обработки.

Программы и методы обработки

Для обработки данных методом LURR применялся разработанный в ИМГиГ ДВО РАН [Закупин, 2016] запатентованный программный комплекс Seis-ASZ. Для анализа территория Сахалина 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 ($M = 3.3-5.0$). 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. 2 приведены параметры для всех расчетных областей, зеленым цветом отмечены зоны, для которых расчет может быть проведен, а красным – недопустимые для расчета.

Таблица 2. Расчетные зоны (каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг.)

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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 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
М = 3.3–5	30	62	144	201	188	53	8

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. 2 рассмотрены примеры расчета в двух областях для демонстрации определения порога, а также для классификации аномалий.

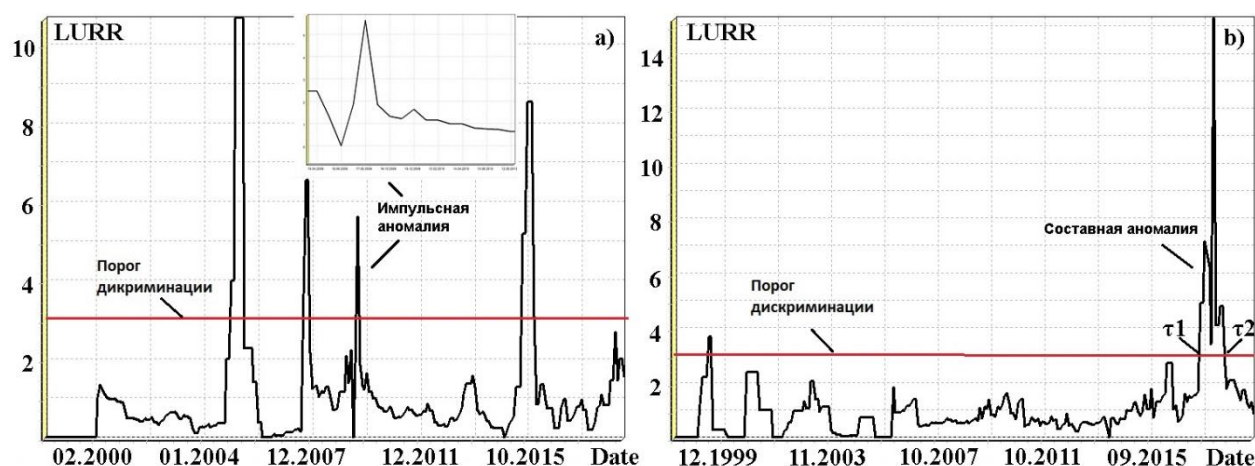


Рис. 2. Примеры расчета параметра LURR для областей с центрами:
а) 48.5° N, 142.5° E, б) 47.0° N, 141.5° E.

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. 2 а), однако если есть череда таких импульсов (подряд), то их можно считать аномалией. Составная аномалия, на которой выделяется нескольких пиков (пример на рис. 2 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 первом графике в итоге 3 аномалии, на втором всего одна. Для определения целей прогноза (землетрясений с $M > 5$) необходимо провести декластеризацию. Декластеризация выполнена с помощью вычислительных программ идентификации кластеров землетрясений в четырех вариантах [Gardner and Knopoff, 1974; Uhrhammer 1986; Reasenber, 1985; Grünthal et al., 2009]. Использовался программный комплекс ZMAP [Wiemer S., 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 глубокие 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 сохраняется в двух случаях и исключено в двух других. Тем не менее мы сохраняем для анализа все 19 землетрясений.

Результаты и обсуждение

На основе анализа полученных распределений параметра LURR для 36 расчетных областей по каталогу 1997–2019 гг. в каждой из них были выделены аномалии, для каждой из которых приведено время появления (первая точка после превышения уровня дискриминации) (табл. 3а). Всего в этих зонах выявлено 77 аномалий за 22 года, по времени и пространству они были сгруппированы. Как пример, приведено 7 областей с аномалиями, которые появляются в период с августа 1999 по июнь 2001 г. Все они являются соседними и определяют один период тревоги –

один прогноз. Цветом в таблицах выделены аномалии, которые появляются на периодах не более 2 лет в соседствующих областях, это позволяет объединить их в группы (каждая группа обозначена своим цветом). Например, 5 аномалий на юге острова, появившихся с августа 1999 по июнь 2001 г., создают зону тревоги с 45.0° по 47.5° N, а период тревоги открывается с августа 1999 г. (желтый цвет). Или, например, аномалии в 9 областях с мая 2015 по июнь 2016 г. (бирюзовый цвет). В итоге реализацией для периода тревоги в этих районах стали землетрясения в 2016 (Онорское) и 2017 (Крильонское) годах.

Таблица 3а. Аномалии LURR по расчетным областям для каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 для Сахалина (шаг 0.5°) и время их появления

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	49.0 N, 142.0 E	25.12.2008; 20.10.2015
46.0 N, 142.0 E	19.12.1999; 01.05.2002; 26.07.2015	49.0 N, 142.5 E	25.12.2008; 20.11.2015
46.0 N, 142.5 E	22.01.2000	49.5 N, 142.0 E	12.02.2000; 19.08.2015; 04.10.2018
46.5 N, 141.0 E	09.05.2003; 19.03.2011; 27.05.2015; 14.01.2018	49.5 N, 142.5 E	26.11.2008
46.5 N, 141.5 E	15.08.1999; 09.04.2001	52.0 N, 142.0 E	17.06.2001; 28.08.2004; 14.12.2007; 07.06.2014
46.5 N, 142.0 E	23.10.1999; 09.04.2001; 27.06.2001		
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	10.09.2003; 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	11.09.2003; 23.12.2008; 18.11.2015	53.5 N, 143.0 E	23.11.2016; 15.04.2018
48.5 N, 142.5 E	11.09.2003; 23.12.2008; 16.02.2016		

Всего за 22 года в разных частях острова установлено 15 периодов тревоги, причем они были представлены разным количеством расчетных зон и разной площадью территорий, которые они занимали. Результаты показаны на картах ниже (рис. 3–6), на них же нанесены землетрясения ближайшие по времени (не позднее 3 лет после появления аномалии) и позиции к зонам тревоги (пригодные для прогнозирования).

Расчеты были 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). Практически во всех преобладающая 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 (таблица 3б), определено, что аномалии в узловых (совпадают с табл. 3а) и промежуточных точках одинаковы, т.е. 6 аномалий (1999–2001, 2002, 2007, 2011, 2015, 2018 гг.) повторяются в узлах и присутствуют в сегменте. Различия проявились для областей промежуточных лишь на одном периоде – в 5 случаях появилась новая аномалия 2004 г. В табл. 3б 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 (дополнительные аномалии для прогноза Горнозаводского землетрясения), однако это существенно увеличивает затраты ресурсов.

Таблица 3б. Аномалии LURR в расчетных областях для каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН 1997–2019 гг. (локальная область 46.0° N , 141.0° E – 46.5° N , 142.0° E , шаг 0.1°) и время их появления

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

В табл. 4 показаны 19 землетрясений, которые остались в нашем каталоге после декластеризации. Красным 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. 4). Периоды тревоги (T1 и T2) для каждого землетрясения в табл. 4 выделены по первой (τ_1) точке при выходе аномалии за уровень дискриминации и последней точке (τ_2) перед возвращением параметра к фоновым значениям. Например, на юге ряд аномалий появляется в конце 1999 г., но завершается уже в 2001 г., а те, что появляются в 2000, также завершаются в 2001 г., при этом в первом подходе тревожный период с 1999, а во втором во всех случаях – с 2001 г. Величина периодов тревоги с учетом такого подхода существенно снижается (табл. 4). Результаты будем группировать по географическому принципу, но стараться придерживаться естественного временного хода.

1. Аномалия зарегистрирована в пределах 49.5° N, 142.0° E (рис. 3а) в феврале 2000 г. Очевидная и довольно быстрая реализация – Углегорское землетрясение 4.08.2000 (№ 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. 3 а). Зона тревоги в пределах 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.

Таблица 4. Землетрясения с $M > 5$ в каталоге 1997–2019 гг. после декластеризации

№	Дата Время	M	°N	°E	Географическая позиция	P ₁₅	P ₁₀₀	ГК	У	Гр	T1, дни	T2, дни
1	04.08.2000 21:13:00	7	48.64	142.18	Углегорское	+	+	+	+	+	170	26

2	01.09.2001 13:08:00	5.2	47.3	142.66	Такойский рой	+	+	+	+	+	739	314
3	08.03.2005 23:58:00	5.1	52.26	141.79	Район мыса Погиби	+	+	+	+	+	299	239
4	12.06.2005 04:17:00	5.5	52.86	144.18	Пильгунское	+	+	+	+	+	389	329
5	17.08.2006 15:20:00	5.6	46.55	141.85	Горнозаводское	+	+	+	+	+	331	241
6	02.08.2007 02:37:00	6.2	46.83	141.81	Невельское	+	+	+	+	+	83	25
7	21.09.2007 00:34:00	5	47.26	142.76	Между Соколом и Такое	+	+	+	+	+	741	655
8	16.03.2010 09:44:00	5.4	52.19	142.41	Уангское	+	+	+	+	+	820	610
9	16.02.2010 07:09:00	5	49	141.34	В Татарском проливе 50 км на запад от Углегорска	+	+	+	+	+	425	240
10	23.06.2011 10:32:00	5	49.17	142.84	15 км к ЮЗ от Поронайска	+	+	+	+	+	951	773
11	12.10.2011 06:31:00	5.3	49.22	142.28	14 км на СВ от Шахтерска	+	+	+	+	+	1054	910
12	02.12.2011 02:39:00	5.2	48.84	141.88	28 км к югу от Углегорска (в проливе у с. Орлово)	+	+	+	+	+	1104	960
13	12.12.2011 09:33:00	5.6	50.63	143.1	Тымовское	+	+	+	+	+	1114	970
14	29.12.2011 02:51:00	5.1	48.92	142.22	20 км на ЮВ от Углегорска (Краснополье)	+	+	-	+	-	1131	953
15	21.10.2012 11:57:00	5	53.36	142.56	37 км к ЮЗ от Охи.	+	+	+	+	+	-	-
16	25.11.2013 03:23:00	5.1	45.88	141.79	26 км на ЮЗ от мыса Крильон	+	+	+	+	+	970	730
17	19.02.2014 12:49:00	5	52.18	142.58	Около пос. Ноглики	+	+	+	+	+	-	-
18	14.08.2016 11:15:00	5.8	50.32	142.49	Онорское	+	+	+	+	+	360	193
19	23.04.2017 06:37:00	5	46	142.05	Крильонское	+	+	+	+	+	632	602

Примечания. P_{15} и P_{100} – алгоритм Ризенберга [Reasenber, 1985] в двух вариантах параметра зоны нуклеации, ГК – алгоритм Гарднера–Кнопова [Gardner, Knoroff, 1974], У – алгоритм Урлхаммера [Uhrhammer, 1986], Гр – алгоритм Грюнделя [Grünthal et al., 2009]. T1 – период тревоги, отсчитываемый от первой точки (τ_1) выхода параметра LURR из фоновых значений, T2 – период тревоги, отсчитываемый от последней точки (τ_2) перед возвращением параметра LURR к фоновому уровню.

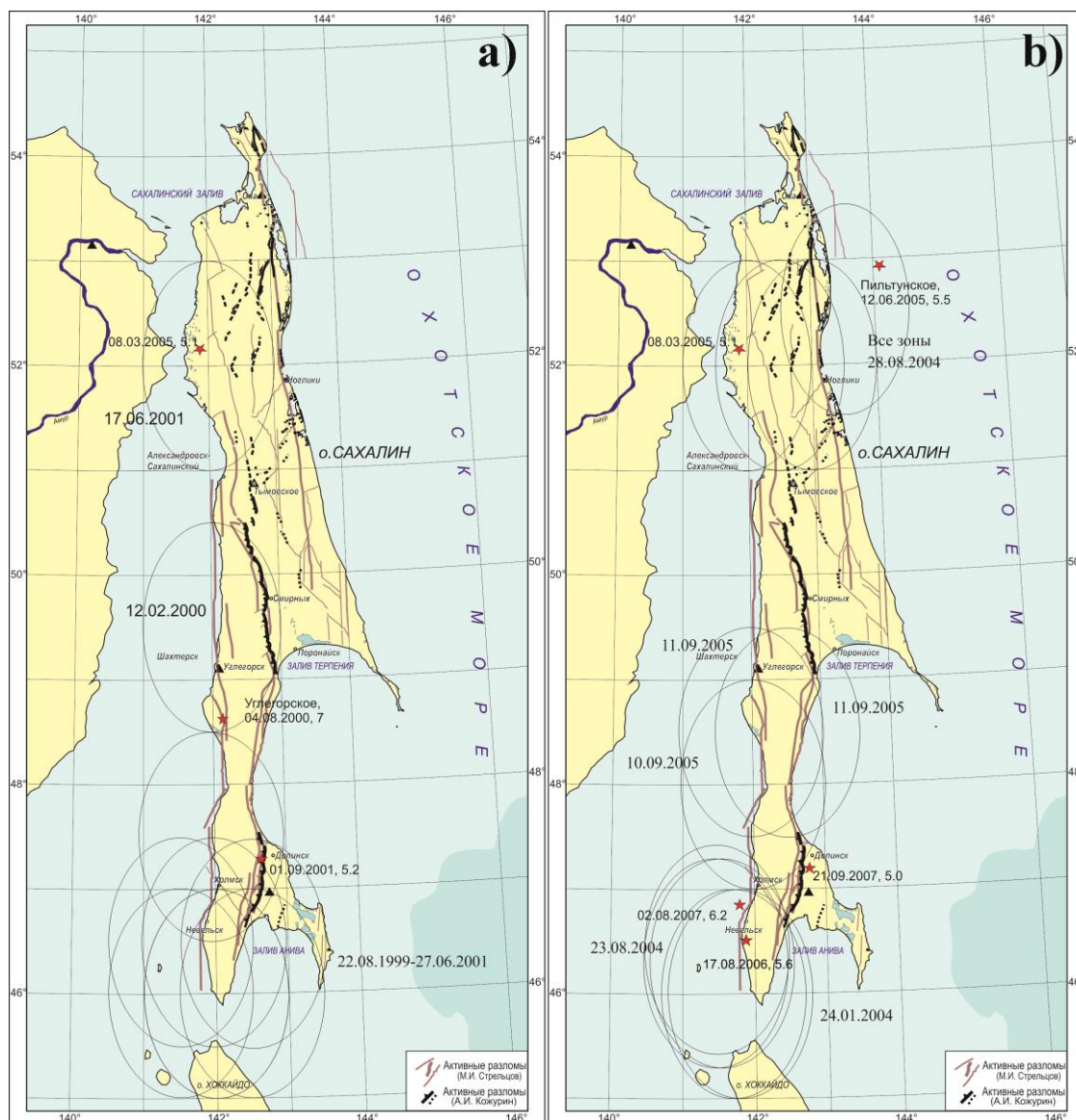


Рис. 3. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: а) 1999–2001 гг., б) 2004–2005 гг.

3. Аномалия в июне 2001 г. на севере острова (рис. 3 а) обнаружена в одной расчетной зоне, принимается ложной тревогой, хотя здесь же в 2005 г. произошло землетрясение с $M = 5.1$, но период тревоги стал бы одним из самых больших в данной работе и составил бы 1361 день.

4. Аномальные зоны в 2002 и 2003 гг. (рис. 4 а) ложные, но отметим, что недалеко от этих зон произошло одно из сильнейших за период наблюдений глубокое землетрясение (478 км) в 2004 г. Информацию о нем приводим просто к сведению, поскольку в статистике мы глубокие землетрясения не учитываем.

5. Аномалии 2004 г. в 5 южных областях (получены при детализации выборок через 0.1° для области Невельского и Горнозаводского землетрясений) являются предвестниками Горнозаводского землетрясения (рис. 3 б). Не будем их включать в статистическую обработку как полученные в других условиях выбора областей.

6. Четыре аномалии августа 2004 г. (рис. 3 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. 3 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 другу (рис. 6 а). Для Невельского землетрясения период тревоги стал самым коротким среди всех случаев – 83 дня.

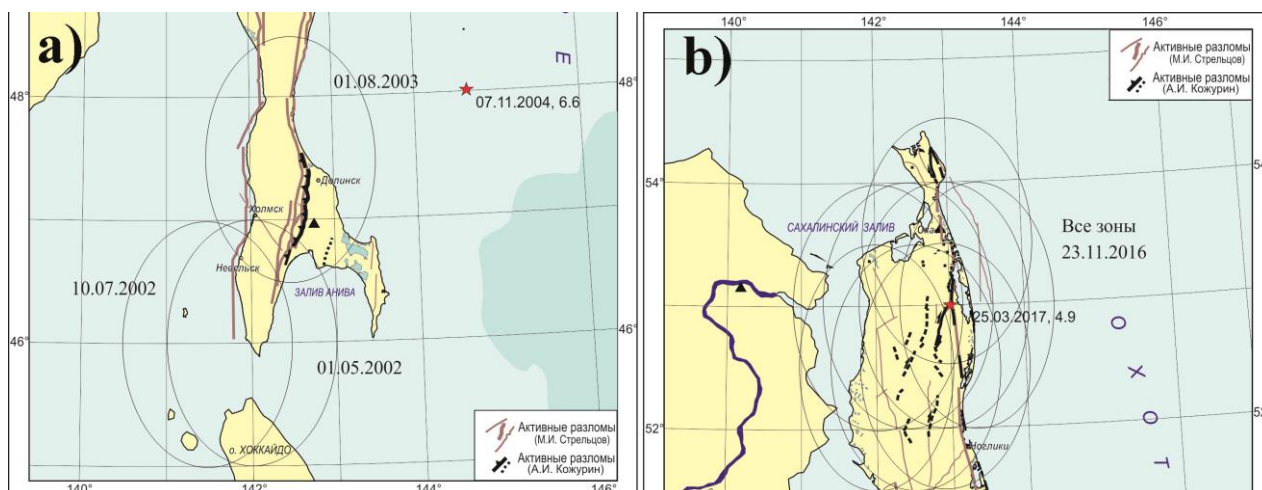


Рис. 4. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды ложных тревог: а) 2002–2003 гг., б) 2016 г.

9. В период с 2007 по 2009 гг. аномальные зоны «захватили» практически весь остров (рис. 5 а). Первая зона тревоги представлена 3 областями 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). По факту все аномалии 2008 г. произошли в конце года, т.е. можно говорить и о ряде аномалий 2009 г. В качестве реализаций выступают землетрясения 2010–2011 гг., включая Тымовское, которое находится у верхней границы. При таких пространственных и временных параметрах зон есть основание считать всю территорию единой зоной и периодом тревоги, а 6 произошедших землетрясений – успешными прогнозами.

10. Аномалия 2010 г. в единственной зоне может являться предвестником 4 декабрьских землетрясений 2011 г. с периодами ожидания 533 и 560 дней (рис. 6 б), но на этой территории прогноз открыт по аномалии 2008 г., поэтому ее появление не меняет период ожидания. В то же время эта аномальная зона может быть уточняющей для прогноза 2008–2009 гг. по центральной части острова (рис. 5 а).

11. Аномалия 2011 г. в одной области с периодом тревоги 970 дней для землетрясения № 16 (рис. 6 б).

12. В 2014 и 2015–2016 гг. выделены 2 тревожных периода (рис. 5 б), первый из которых представляет собой ложную тревогу, а второй приходится прогнозом для Онорского (№ 18) и Крильонского (№ 19) землетрясений.

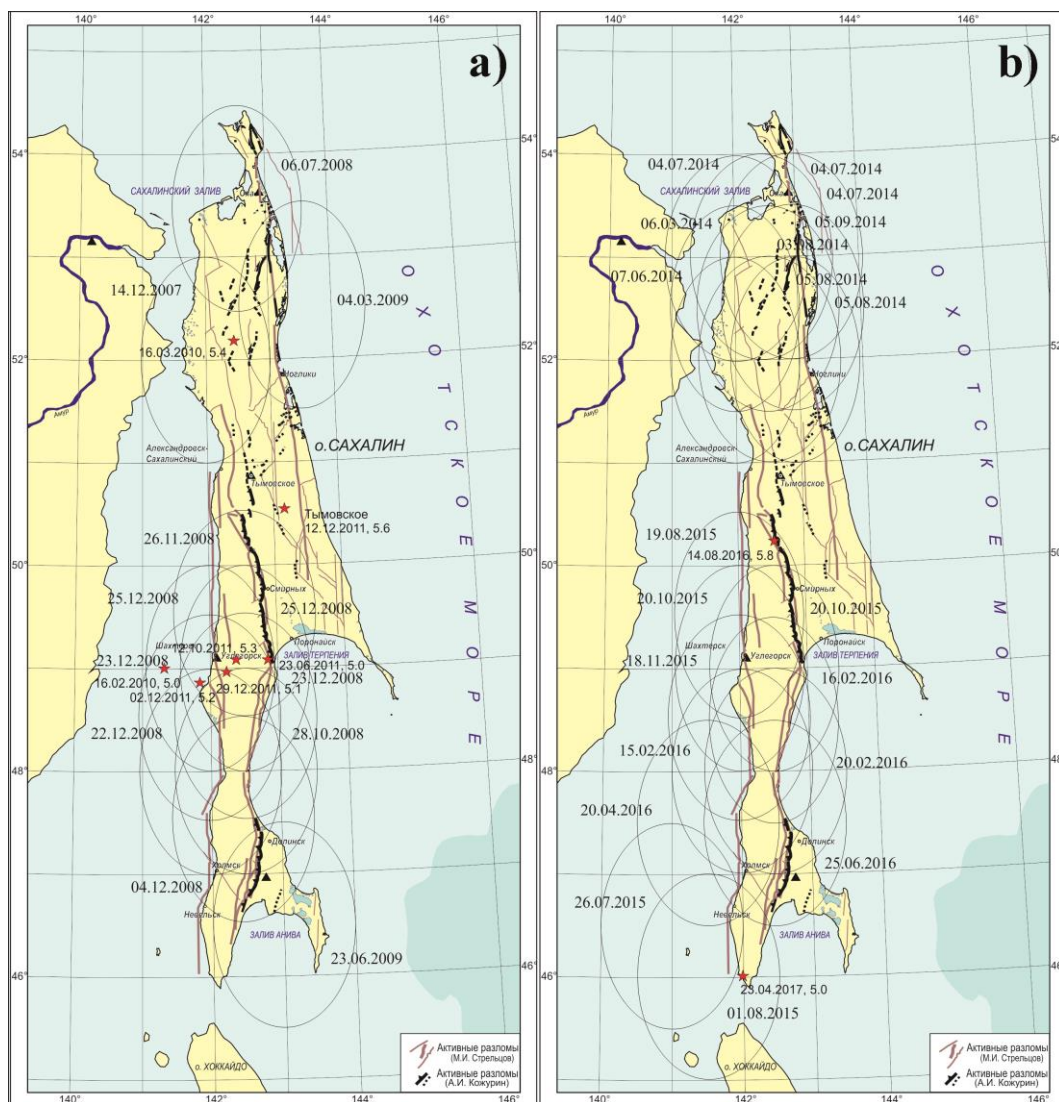


Рис. 5. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги:
а) 2008–2009 гг., б) 2014–2016 гг.

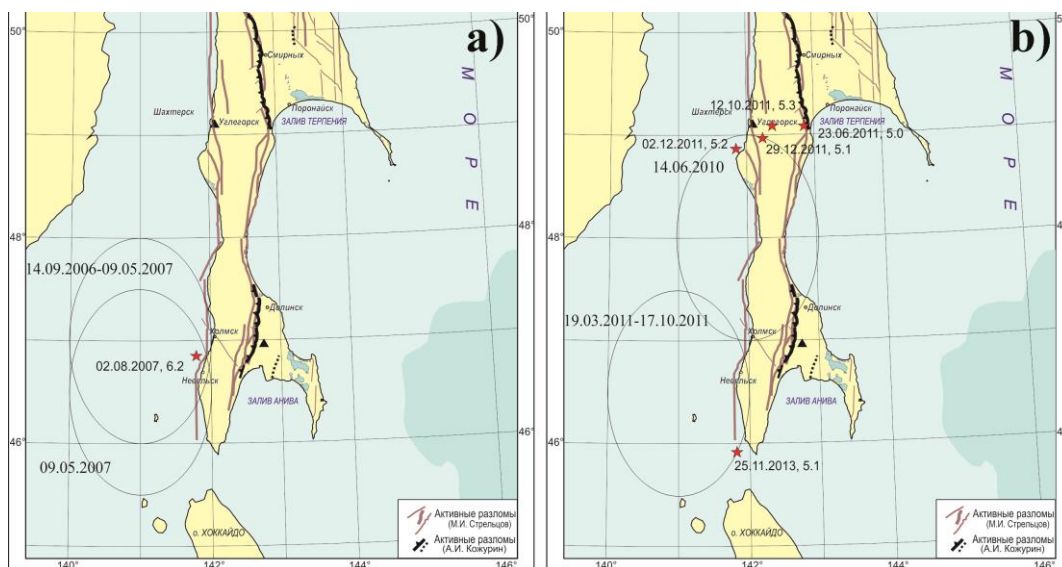


Рис. 6. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги:
а) 2007 г., б) 2010–2011 гг.

13. На рис. 4 б показана ложная тревога, объединяющая 8 соседних аномалий в конце 2016 г. Землетрясение с $M = 4.9$ могло бы быть целью для данного периода тревоги, но не хватает одной десятой для попадания в список ($M = 5$), его нанесли на карту для сведения, как и в случае, который показан на рис. 4 а.

Аномалии 2018 г. не рассматриваются в данной работе, так как даже по средним оценкам тревожный период по ним еще не завершен (по максимальной оценке из табл. 4 – около 3 лет). А если, например, взять времена этих же аномалий, но по последней точке перед возвращением параметра к фону, то самая поздняя аномалия завершается лишь в апреле 2019 г.

В итоге из 15 тревожных периодов (рис. 3–6), которые представлены зонами с аномальными значениями LURR, 11 были завершены землетрясениями, а 4 (26 %) стали ложными тревогами (2001, север; 2002–2003, юг; 2014, север; 2016, север). При этом из 19 землетрясений с $M > 5$ два с магнитудами $M = 5$ в 2012 и 2014 гг. (в северной части острова) не попали в прогнозные области и периоды (пропущенные цели, 11 %). Учитывая, что ни одно из землетрясений не произошло до того, как значения параметра LURR успевают вернуться к фоновым значениям, можно при расчете периода тревоги брать последнюю точку перед возвращением в фон (t_2). При этом не только снижается время ожидания (табл. 4, T_2), но и сближаются времена фиксации аномальных областей. Так, по первым точкам аномалии были зафиксированы на юге с августа 1999 по июнь 2001 г. (22 мес.), а по последним – с октября 2000 по июль 2001 (9 мес.). Улучшается ситуация по сближению времен аномалий и в 2009 и 2016 гг. (рис. 7). Например, в центральной и южной части острова по первым точкам аномалии были зафиксированы с апреля по сентябрь 2009 г. (5 мес.), а по последним – с октября 2008 по июнь 2009 (8 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, 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 территории 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. Аномалии в конце 2016 г. на севере, которые происходят в период тревоги, фактически снимают период тревоги, который был начат с 2014 г., переводя их в ложную тревогу. Новый период тревоги в данном случае действует до конца 2019 г. Как подходить к оценке эффективности прогнозов методом LURR – весьма сложный вопрос. На рис. 8 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. 2 области, которые пригодны 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 ($46\text{--}48^\circ \text{ N}$) зоны. 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.

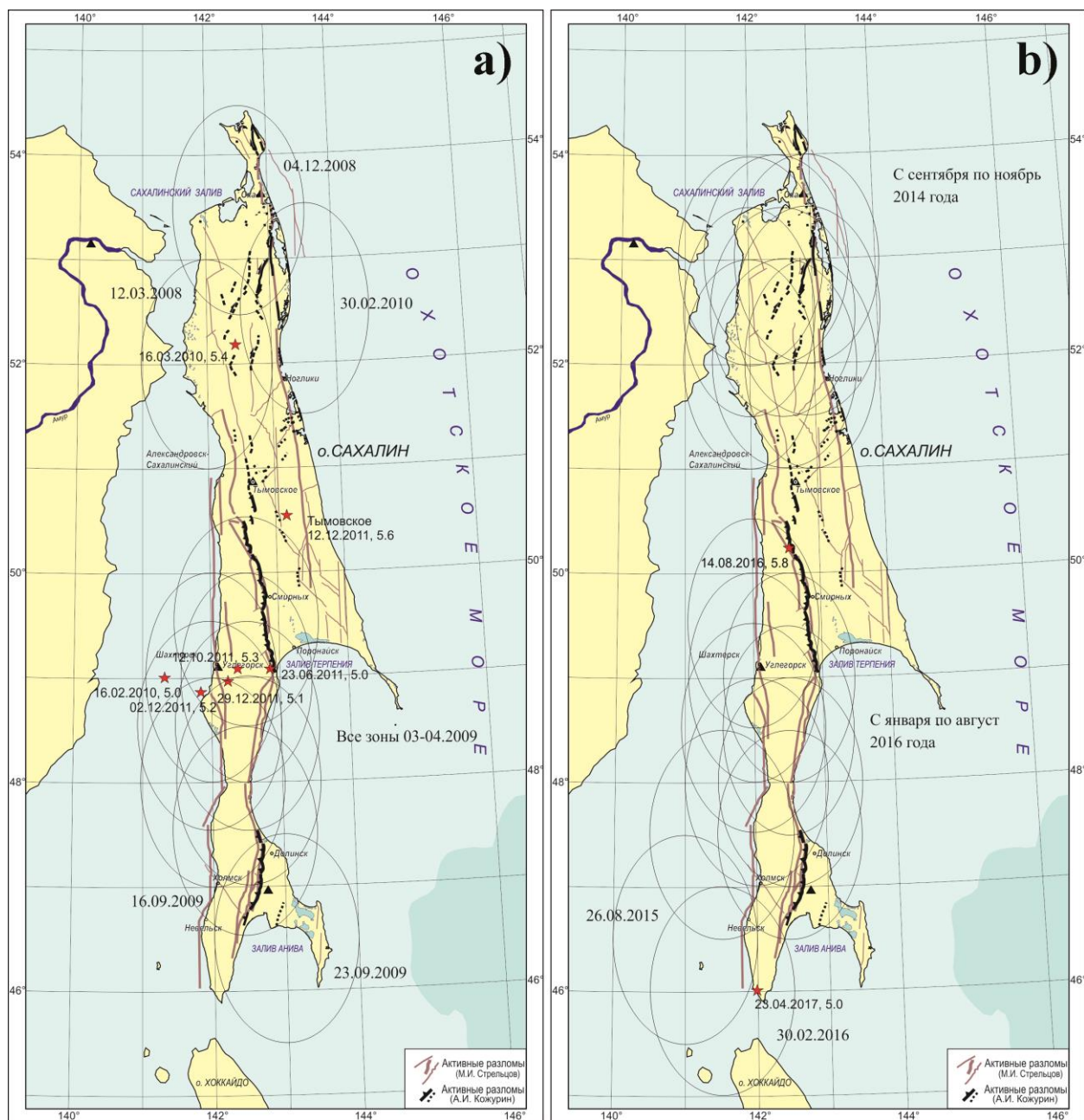


Рис. 7. Аномальные зоны (показаны эллипсами) и землетрясения (звездочки) в периоды тревоги: а) 2008–2009 гг., б) 2014–2016 гг. Время появления аномалий в областях указано по t_2 .

Насколько часто появляются аномалии? Например, для центральной зоны они фиксируются в 2000, 2005, 2009 и 2015 гг. В среднем периоды тревоги открываются каждые 5 лет, но есть одна деталь – в 2005 г. (рис. 3 б) аномалии появляются только на территории центральной и южной зон. Реализация для этого периода тревоги с некоторой погрешностью по пространству состоялась в августе 2006 г. в южной зоне, а, следовательно, ложной тревогой считаться этот период не может, но для центральной зоны он не актуален. В итоге в центральной части остаются действующими три периода тревоги, которые открывались бы в 2000 (июль), 2009 (март) и в 2016 (январь) гг. Даже при открытии тревоги на три года общее время прогноза за 22 года всего 9 лет. А если принять во внимание, что в центральной области землетрясения происходили в августе 2000 (Углегорское), с 2010 по 2011 (6 землетрясений, включая Тымовское) и в августе 2016 г. (Онорское), то, не применяя хитрых математических приемов, можно признать метод эффективным. Хуже обстоят дела в северной и южной зонах, однако и там можно оценить

эффекты, особенно для землетрясений большой магнитуды (Уангское, Пильтунское, Невельское, Горнозаводское).

К сожалению, наши попытки оценить метод LURR известными методами анализа эффективности прогнозов землетрясений [Гусев, 1974; Molchan, 1991] не увенчались успехом. 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 вполне просто на основе известной информации по потенциалу основных генерирующих зон и законов повторяемости землетрясений.

Обсуждение результатов завершим картой (рис. 8 б) областей аномальных значений LURR в 2018 и 2019 гг.

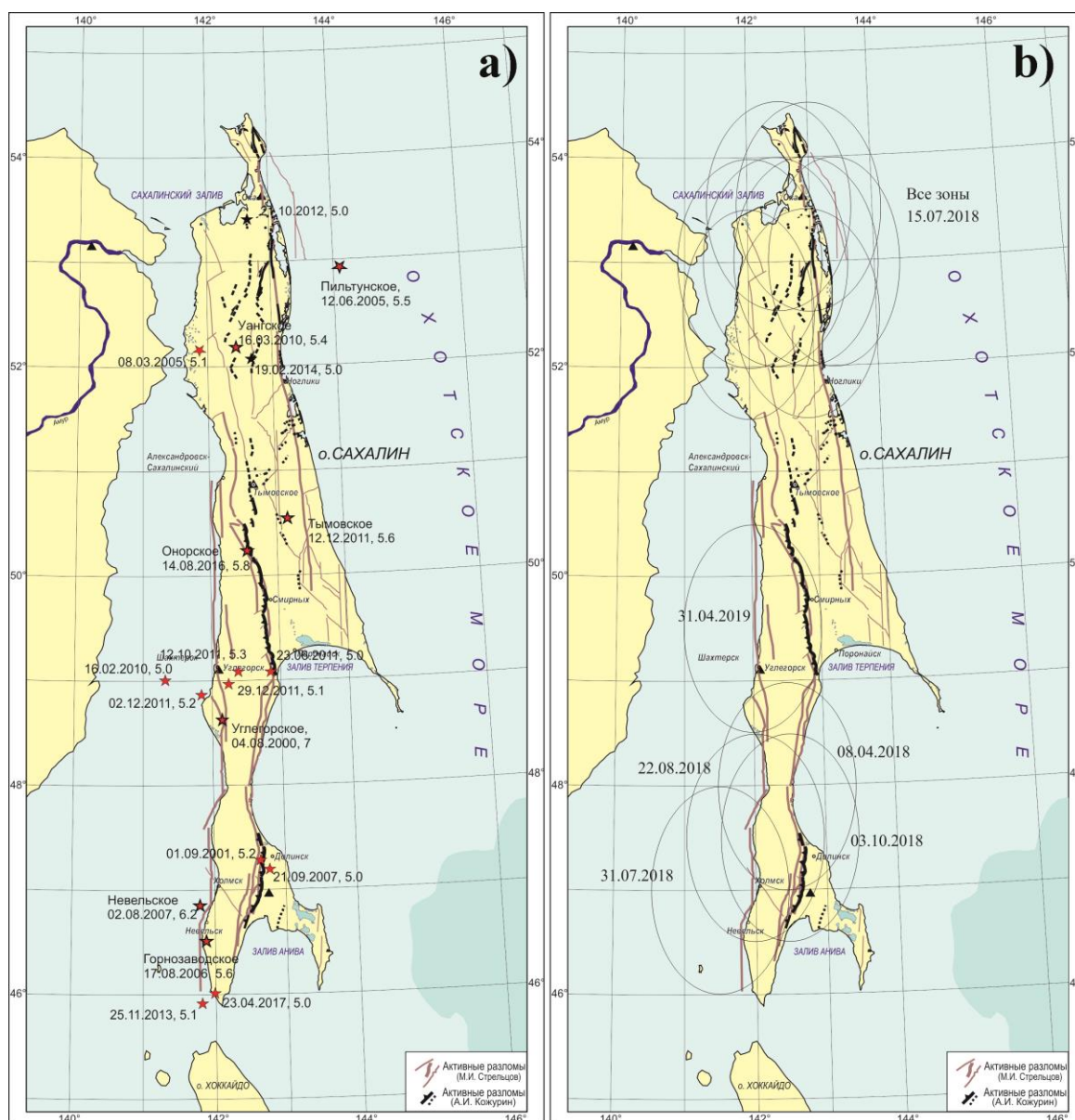


Рис. 8. а) землетрясения из табл. 4, б) аномальные области 2018–2019 гг.
Время появления аномалий в областях указано по τ_2 .

Ситуация 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 и 2016–2017 гг., причем определить, какая зона должна отработать первой, невозможно. При среднем периоде повторяемости событий с $M = 5–6.0$ раз в 5 лет, можно полагать, что в 2021 г. можно ожидать такое землетрясение в средней зоне (скорее всего, в районе от 49 до 50° N), а в 2022 г. – в южной (вероятнее всего, в Долинском районе). Северная зона менее предсказуема, однако с учетом ложной тревоги в конце 2016 г. здесь также существует вероятность реализации прогноза в 2021–2022 гг. (даже при возможном частичном снятии напряжений в 2017 г. землетрясением с $M = 4.9$, рис. 4 б).

Заключение

В данной работе на примере острова Сахалин показаны общие принципы, которые необходимо соблюдать при использовании методики прогноза землетрясений LURR. Эти общие принципы выделения аномалий, определения тревожных периодов, подготовки каталогов, проведения расчетов позволяют с оптимизмом оценивать дальнейшие перспективы метода. 17 землетрясений из 19 оказались в зонах с аномалиями в периоды тревоги не более трех лет. Из 15 таких периодов лишь 4 оказались ложными, т.е. 75 % тревог дали прогноз для 89 % землетрясений с $M > 5$, а если рассматривать самые сильные, то результат и вовсе стопроцентный. Кроме того, по результатам данной работы на территории о. Сахалин выявлены многочисленные аномалии в 2018–2019 гг. (во всех трех основных зонах генерации), которые указывают на высокую вероятность появления землетрясений умеренных магнитуд в ближайшие два года.

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. Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. **1989**. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока). В кн.: *Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР: (Методические работы ЕССН)*. М.: Наука, 32–51.
2. 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.
3. Закупин А.С. **2016**. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса. *Геоинформатика*, 1: 34–43.
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 Онорского 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., 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/gtr.2020.4.2.160-168.169-177>
7. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. **2020**. Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СПП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, 1: 66–78. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>

8. Кондорская Н.В., Аранович З.И., Соловьева О.Н., Шебалин Н.В. **1982.** *Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР.* М.: Наука, 272 с.
9. Коновалов А.В., Сычев А.С. **2014.** Калибровочная функция локальной магнитуды и межмагнитудные связи для северного Сахалина. *Вулканология и сейсмология*, 6: 75–86.
10. Краева Н.В. **1997.** Исследование сейсмичности на юге Сахалина в 1992–1996 гг. по данным IRIS-2. *Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, т. 5: 149–162.
11. 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.
12. Раутиан Т.Г. **1960а.** Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений. *Труды Таджикского института сейсмостойкого строительства и сейсмологии*, 7: 41–86.
13. Раутиан Т.Г. **1960б.** Энергия землетрясений. В кн.: Методы детального изучения сейсмичности. *Труды ИФЗ АН СССР*, 176(9): 75–114.
14. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. **1967.** Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений. *Физика Земли*, 2: 13–23.
15. Федотов С.А. **1963.** О поглощении поперечных сейсмических волн в верхней мантии и энергетической классификации близких землетрясений с промежуточной глубиной очага. *Известия АН СССР, Сер. геофизическая*, 6: 820–849.
16. Фокина Т.А., Паршина И.А., Рудик М.И., Бобков А.О., Шолохова А.А. **2003.** Сахалин. В сб.: *Землетрясения Сев. Евразии в 1997 г.* Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН: 122–128.
17. 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.
18. 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>
19. Hanks T., Ramanori H. **1979.** A moment magnitude scale. *J. of Geophysical Research*, 84(5): 2348–2350.
20. 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.
21. Molchan G. **1991.** Structure of optimal strategies in earthquake prediction. *Tectonophysics*, 193: 267–276.
22. Reasenber P. **1985.** Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *J. of Geophysical Research*, 90(3–18): 5479–5495.
23. Richter C. **1958.** *Elementary seismology.* San Francisco, Calif., 578 p.
24. Stepnov 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>
25. Uhrhammer R. **1986.** Characteristics of Northern and Central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1): 21.
26. 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
27. 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.10.1007/s00024-006-0135-x>

References

1. Bobkov A.O., Kuznetsova V.N., Nagornykh T.V., Rudik M.I. **1989.** [Printsipy formirovaniya i sostav algoritmicheskogo obespecheniya regional'nogo tsentra obrabotki seysmologicheskikh nablyudeniy (na primere Dal'nego Vostoka)]. In: *Seysmologicheskie nablyudeniya na Dal'nem Vostoke SSSR: (Metodicheskie raboty ESSN) []*. Moscow: Nauka, p. 32–51.
2. 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.).

3. Zakupin A.S. **2016**. Program complex for the analysis of instability of seismic process. *Geoinformatika*, 1: 34–43. (In Russ.).
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., 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. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.160-168.169-177> (In Russ. & Engl.)
7. 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>
8. Kondorskaya N.V., Aranovich Z.I., Solov'yeva O.N., Shebalin N.V. **1982**. *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh Yedinoi sistemy seysmicheskikh nablyudeniy SSSR* []. Moscow: Nauka, 272 p.
9. Konovalov A.V., Sychev A.S. **2014**. A calibration curve of local magnitude and intermagnitude relations for northern Sakhalin. *J. of Volcanology and Seismology*, 8(6): 390–400.
10. Krayeva N.V. **1997**. Issledovaniye seysmichnosti na yuge Sakhalina v 1992–1996 gg. po dannym IRIS-2. In: *Geodinamika tektonosfery zony sochleneniya Tikhogo okeana s Evraziey = Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN [IMGG FEB RAS], vol. 5: 149–162. (In Russ.).
11. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. [*Regional catalog of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*]. Authors: Poplavskaya L.N., Ivashchenko A.I., Oskorbin L.S., Nagornyykh T.V., Permikin Yu.Yu., Poplavskii A.A., Fokina T.A., Kim Ch.U., Kraeva N.V., Rudik M.I. et al. Iuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
12. Rautian T.G. **1960a**. Zatulvaniye seysmicheskikh voln i energiya zemletraseniy []. *Trudy Tadzhikskogo instituta seysmostoynkogo stroitel'stva i seysmologii*, 7: 41–86.
13. Rautian T.G. **1960b**. [The energy of earthquakes]. In: *Methody detal'nogo izycheniia seysmichnosti [Methods for a detailed study of seismicity]*. Moscow: Izd-vo AN SSSR [Publ. Academy of Sciences of the USSR], 176: 75–114. (In Russ.).
14. Solov'yev S.L., Solov'yeva O.N. **1967**. [Sootnosheniye mezhdu energeticheskimi klassami i magnitudoy kuril'skikh zemletraseniy]. *Izvestiya RAN, Fizika Zemli*, 2: 13–23.
15. Fedotov S.A. **1963**. O pogloshchenii poperechnykh seysmicheskikh voln v verkhney mantii i energeticheskoy klassifikatsii blizkikh zemletraseniy s promezhutochnoy glubinoi ochaga []. *Izvestiya AN SSSR, Ser. geofizicheskaya*, 6: 820–849.
16. Fokina T.A., Parshina I.A., Rudik M.I., Bobkov A.O., Sholokhova A.A. **2003**. Sakhalin. In: *Zemletraseniya Severnoy Evrazii v 1997 godu [Earthquakes of the Northern Eurasia in 1997]*. Obninsk: GS RAN [GS RAS], 122–128. (In Russ.).
17. 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.
18. 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>
19. Hanks T., Ramanori H. **1979**. A moment magnitude scale. *J. of Geophysical Research*, 84(5): 2348–2350.
20. Levin B.W., Kim C.U., Solov'ev 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.
21. Molchan G. **1991**. Structure of optimal strategies in earthquake prediction. *Tectonophysics*, 193: 267–276.
22. Reasenberg P. **1985**. Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. *J. of Geophysical Research*, 90(3–18): 5479–5495.
23. Richter C. **1958**. *Elementary seismology*. San Francisco, Calif., 578 p.
24. 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>

25. Uhrhammer R. **1986**. Characteristics of Northern and Central California seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1): 21.
26. 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
27. 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.10.1007/s00024-006-0135-x>

Об авторах

ЗАКУПИН Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, зам. директора, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022 Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, a.zakupin@imgg.ru, (ORCID 0000-0003-0593-6417)

БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна, научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022 Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, fily77@mail.ru, (ORCID 0000-0002-3126-5138)