УДК 550.343(571.642) https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты

© 2020 *А. С. Закупин*, Н. В. Богинская*

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
**E-mail: a.zakupin@imgg.ru*

Резюме. Проведен ретроспективный анализ сейсмического режима центральной части о. Сахалин в период 1997–2005 гг. методом LURR (load/unload response ratio). Расчеты для этой части острова за указанный период ранее не проводились ввиду недостаточности данных в расчетной выборке событий. В данной работе привлечена дополнительная информация из двух независимых каталогов. Проанализирован методом LURR характер сейсмичности перед Углегорским землетрясением 4 августа 2000 г. (Mw = 6.7), которое до сих пор значилось как пропущенная цель в серии из 7 прогнозных оценок сахалинских землетрясений с магнитудой выше 5.5. Результаты расчетов выявили предвестник – аномалию параметра LURR, на основании которого точно определено место и время условно (ретроспективно) прогнозируемого события. Аномалия параметра LURR зафиксирована в расчетной области в феврале 2000 г., за 6 мес. до землетрясения.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, предвестник землетрясения, ретроспективный анализ.

Для цитирования: Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 2, с. 160–168. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results

Aleksander S. Zakupin, Nataliya V. Boginskaya*

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
**E-mail: a.zakupin@imgg.ru*

Abstract. A retrospective analysis of seismic regime in the central part of Sakhalin Island within the period from 1997 to 2005 by the LURR (load/unload response ratio) method is presented. Estimates were not earlier conducted for the outlined period due to a lack of data in the rated sampling of this part of the island. In the present work, additional information from two independent catalogues is adduced. Seismicity behaviour prior to the Uglegorsk earthquake of 4 August 2000 (Mw = 6.7) was considered according to the LURR method. This earthquake was up till now considered as a missed target in the series of 7 predictive assessments of Sakhalin earthquakes having a magnitude above 5.5. The computation results revealed the LURR parameter anomaly to be a precursor, on which basis the location and time of the conditionally predictable event were accurately determined. The LURR parameter anomaly was noted in the rated area in the February of 2000, 6 months prior to the earthquake's occurrence.

Keywords: seismicity, seismic events, LURR method, earthquake precursor, retrospective analysis.

For citation: Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 169–177. (In Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.160-168.169-177

Введение

В последние несколько лет на Сахалине сотрудниками Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) в области среднесрочных оценок сейсмической опасности для землетрясений с Mw > 5.5 получен ряд интересных результатов. Методом LURR [Yin et al., 2000; Yangde et al., 2012]

за период с 1988 по 2019 г. в 6 районах острова были выявлены аномалии в распределениях расчетного параметра (значение отклоняется от базового, равного единице), т.е. предвестники землетрясений [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018].

Метод LURR в первоисточнике [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 2000] связывает появление аномалии с подготовкой в расчетной зоне землетрясения с магнитудой выше верхней границы расчетной выборки. При этом нижняя граница расчетной выборки устанавливается произвольно для отсечения слабой – фоновой сейсмичности. Верхняя же граница показывает минимальную магнитуду ожидаемого землетрясения (главного толчка). Оба этих порога подбираются с учетом характера региональной сейсмичности. Нами экспериментально установлено, что приемлемым вариантом при расчетах для Сахалина нижняя граница может быть выбрана $M = 3.3$, а верхняя – 5.0. При этом выявленные аномалии хорошо согласуются с землетрясениями, у которых $M > 5.5$. Исследователи [Yin et al., 2000; Yangde et al., 2012] отмечают, что период тревоги с момента обнаружения аномалии может составлять от 2 до нескольких лет, а землетрясение должно произойти в расчетной области (линейный размер 100 км).

На Сахалине во всех шести районах в течение не более 2 лет после возникновения аномалий в выявленных зонах произошли сильные сейсмические события. В 4 случаях аномалии были определены постфактум для уже случившихся землетрясений (в ретроспективе), а 2 из 6 зон выявлены в режиме оперативных расчетов (такие проводятся с 2015 г.). Это позволило сделать два официальных прогноза: Онорского (2016 г., Mw = 5.8) и Крильонского (2017 г., Mw = 5.0) землетрясений [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018]. Прогнозы рассматривались на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям. Оба прогноза признаны полностью реализованными, хотя имелись небольшие отклонения по месту очага для Онорского землетрясения (на краю расчетной зоны) [Закупин и др., 2018] и по магнитуде для Крильонского (Mw = 5.0). Землетрясений с Mw > 5.5 на острове, согласно данным из 3 использованных для расчетов сейсмических каталогов [Закупин и др., 2018], за последние 30 лет было 7: Нефтегорское (1995 г., Mw = 7.2), Углегорское (2000 г., Mw = 6.7), Пильтунское (2005 г., Mw = 5.6), Горнозаводское (2006 г., Mw = 5.6), Невельское (2007 г., Mw = 6.2), Уангское (2010 г., Mw = 5.7) и Онорское (2016 г., Mw = 5.8).

В расчетах для северной части острова преимущественно с 50.0° по 54.0° с.ш. с 2006 по 2016 г. применялся каталог сети станций ИМГиГ ДВО РАН [Stepnov et al., 2014]. Этот каталог формировался и поддерживался лабораторией физики землетрясений ИМГиГ ДВО РАН на основе данных 6 станций (одна из них, в г. Оха, принадлежала Сахалинскому филиалу Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН)). Несмотря на то что СФ ФИЦ ЕГС РАН по территории, которую покрывала сеть ИМГиГ ДВО РАН, тоже формировал сейсмический каталог, для расчетов ранее мы использовали каталог ИМГиГ ДВО РАН по причине его большей доступности и оперативности наполнения. С его помощью были выявлены две зоны с аномалиями в 2008 и 2015 гг. Отметим, что аномалия 2008 г. [Закупин и др., 2018] была довольно слабая – параметр незначительно превысил значение 2. Аномалия предваряла Уангское землетрясение в марте 2010 г., и зона с аномалией почти совпала с эпицентром землетрясения. Вторая аномалия была значительной (превышение порога в пять раз), но центр расчетной зоны оказался смещен по отношению к эпицентру реализованного прогноза – Онорского землетрясения – на 1° в северном направлении и на 0.5° в восточном.

Для ретроспективных расчетов на период с 1988 по 2005 г. применялся каталог землетрясений о. Сахалин за 1905–2005 гг. [Поплавская и др., 2006]. По данным этого каталога, в 1988–2005 гг. сейсмических событий в диапазоне рабочей выборки $3.3 \leq M \leq 5.0$ во всех частях острова было недостаточно для проведения статистически значимых расчетов, что весьма снижало степень доверия

получаемым результатам. Однако, поскольку на севере острова было отмечено самое сильное сейсмическое событие на Сахалине – Нефтегорское землетрясение 1995 г. (Mw = 7.2), для северной части острова были выполнены расчеты с помощью данного (за неимением иного для того периода) каталога.

Анализ данных на территории севернее 51.0° с.ш. выявил две зоны сейсмической опасности в 1993 и 2004 г., расположенные недалеко друг от друга, – зоны Нефтегорского и Пильтунского землетрясений. Несмотря на имевшиеся опасения, дефицит расчетных событий не привел к выявлению ложных признаков [Закупин и др., 2018].

Для расчетов по южной части острова с 2003 по 2019 г. использовался каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН. Эти данные позволили выявить предвестник Невельского землетрясения в мае 2007 г. [Закупин и др., 2018], а также сделать оперативный прогноз землетрясения в районе п-ова Крильон после обнаружения аномалии в 2016 г. [Закупин, Семенова, 2018]. Оба землетрясения произошли в указанных зонах, но Крильонское в апреле 2017 г. имело магнитуду 5.0, что ниже установленного нами порога ожидания – 5.5. Ввиду условности данного порога (определение магнитуды по границам выборки) прогноз значится как реализованный.

В целом статистика по Сахалину оказалась впечатляющей, ведь всего перед двумя сильными землетрясениями из 8 (включая Крильонское) не были зафиксированы методом LURR аномалии – перед Углегорским (04.08.2000, Mw = 6.7) и Горнозаводским (17.08.2006, Mw = 5.6). Причины в обоих случаях разные. По Горнозаводскому расчеты были проведены, но не выявлен предвестник, а по Углегорскому расчеты для того периода и той зоны (49–51° с.ш.) не проводились на том основании, что данных в каталоге [Поплавская и др., 2006] для этого недостаточно. Однако предвестник Нефтегорского землетрясения был получен именно по этому каталогу, который захватывает необходимый для расчета период, а магнитуда Углегорского землетрясения Mw = 6.7 немногим меньше магнитуды Нефтегорского (Mw = 7.2). Его «игнорирование», скорее, обусловлено отсутствием жертв (зафиксированы только повреждения конструкций). Но в статистике расчетов по Сахалину этот пробел, конечно, желательно заполнить, с привлечением максимально возможного объема сейсмологической информации. Для этой цели использован каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН, который формируется начиная с 1997 г. и постоянно пополняется, охватывая весь Сахалин. Благодаря этому результат обработки по региональному каталогу [Поплавская и др., 2006] можно сопоставить с результатом по данному каталогу для принятия экспертного решения об аномалиях.

Цель данной работы – проведя методом LURR расчеты по выявлению предвестников в зоне Углегорского землетрясения, показать успешный результат по используемой методике, или, в противном случае, подтвердить нынешний статус этого землетрясения – пропущенная цель.

Методика

Метод LURR был разработан китайскими сейсмологами в 1990-х годах [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 1995]. Его название можно перевести с английского как «отношение отклика среды на нагрузку/разгрузку». Коротко и в упрощенном виде суть метода состоит в следующем [Закупин и др., 2018; Закупин и др., 2020]. Метод опирается на непротиворечивые модели теории упругости (модель абсолютно жесткой Земли) и механики разрушения (критерий Кулона–Мора). Основной посыл состоит в том, что за пределами упругого деформирования среды реакция на нагрузку не соответствует реакции на разгрузку. Со временем это несоответствие только усиливается – вплоть до потери устойчивости разрушающегося объекта. Метод предполагает решение уравнений теории упругости для определения компонент тензора напряжений на площадке, где расположен слип-вектор. Расчеты выполняются для каждого землетрясения в каталоге. При этом учитываются смещения от приливного воздействия в заданной точке. Использование в методе лунно-солнечных приливов оправдано тем, что другого такого идеального откалиброванного индикатора нагруз-

ки/разгрузки в геосреде найти невозможно. Тектоническая и литостатическая компоненты не учитываются, так как скорости их изменения на порядки отличаются от приливных. Для разделения землетрясений на «нагрузочные» и «разгрузочные» проводится расчет критерия Кулона–Мора. Если землетрясение произошло во время роста значения этого критерия, то оно определяется как «положительное», в противном случае как «отрицательное». Исследуемый параметр (LURR) отождествляется с отношением суммарной деформации Беньофа всех положительных землетрясений ко всем отрицательным за некоторый промежуток времени (в математической обработке это величина скользящего окна). В упругопластических средах перед разрушением наблюдается явление текучести, когда при неизменных напряжениях деформация продолжает расти. Очевидно, что при таком положении вещей расчет отношения отклика на нагрузку к отклику на разгрузку не имеет смысла (реакции как таковой нет), а математически параметр LURR снова становится близким к единице. В области перехода от упругого к неупругому деформированию этот параметр начнет расти и вблизи разрушения среды достигнет своих максимальных значений. Именно поэтому в среде, где реализуется хрупкое разрушение, можно ожидать главное (прогнозируемое) событие после выхода кривой на максимальные значения, а в среде, где возможно проявление пластических эффектов, возникает возврат параметра к фоновому уровню и некоторая задержка (временной лаг с момента определения прогнозного признака, аномалии – вариации LURR) по времени. Вероятно, что эта задержка зависит от геологических условий, однако понять эту связь пока не представилось возможным. Методика расчетов по методу LURR подробно излагается в оригинальных работах [Yin X., Yin C., 1991; Yin et al., 1995; Yin et al., 2000], а также в работах исследователей, использовавших метод [Закупин и др., 2018, 2020; Yangde et al., 2012; и др.].

Для расчетов по методу LURR мы применяли разработанный в ИМГиГ ДВО РАН программный комплекс Seis-ASZ с выбором стандартных для наших вычислений параметров: окно 360 дней, сдвиг 30 дней, диапазон магнитуд 3.3–5.0 [Закупин и др., 2018].

Исходные материалы

Расчеты методом LURR для центральной части острова, в том числе района, где произошло Углегорское землетрясение, проведены по двум каталогам: «Региональному каталогу землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.» [Поплавская и др., 2006] и каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН, представленному в печати ежегодными выпусками (например, [Фокина и др., 2019]). Для удобства будем называть их каталог № 1 и № 2.

Первый каталог охватывает период с 1905 по 2005 г. и содержит более 3500 сейсмических событий по о. Сахалин. Каталог № 2 за период инструментальных наблюдений с 1997 г. включает в себя землетрясения всех регионов Северной Евразии с параметрами: гипоцентр, магнитуда, механизм очага, а также макросейсмические данные. В обоих каталогах отражены сейсмические события с магнитудой $M \geq 3.0$.

Для проведения исследований в данной работе была выбрана прямоугольная область с координатами от 48.0° до 50.0° с.ш. и от 141.0° до 143.0° в.д. Выборка землетрясений для расчетов по каждому каталогу сделана с 1997 (за три года до Углегорского землетрясения) по 2005 г.

На рис. 1 представлены карты, построенные по данным каталогов № 1 и № 2, с эпицентрами землетрясений, произошедших с 1997 по 2005 г. в исследуемой зоне. Выборка по первому каталогу составила 363 сейсмических события с $M \geq 3.0$, из них 188 в диапазоне магнитуд ($3.3 \leq M \leq 5.0$), необходимых для проведения расчетов методом LURR. Выборка по второму каталогу 566 землетрясений с $M \geq 3.0$, из них в диапазоне $3.3 \leq M \leq 5.0$ оказалось 320 событий.

На картах представлено пространственно-глубинное распределение эпицентров сейсмических событий. Сопоставление данных по каталогам показало явное различие в количестве событий, а также незначительные расхождения в координатах событий, произошедших за один и тот же период

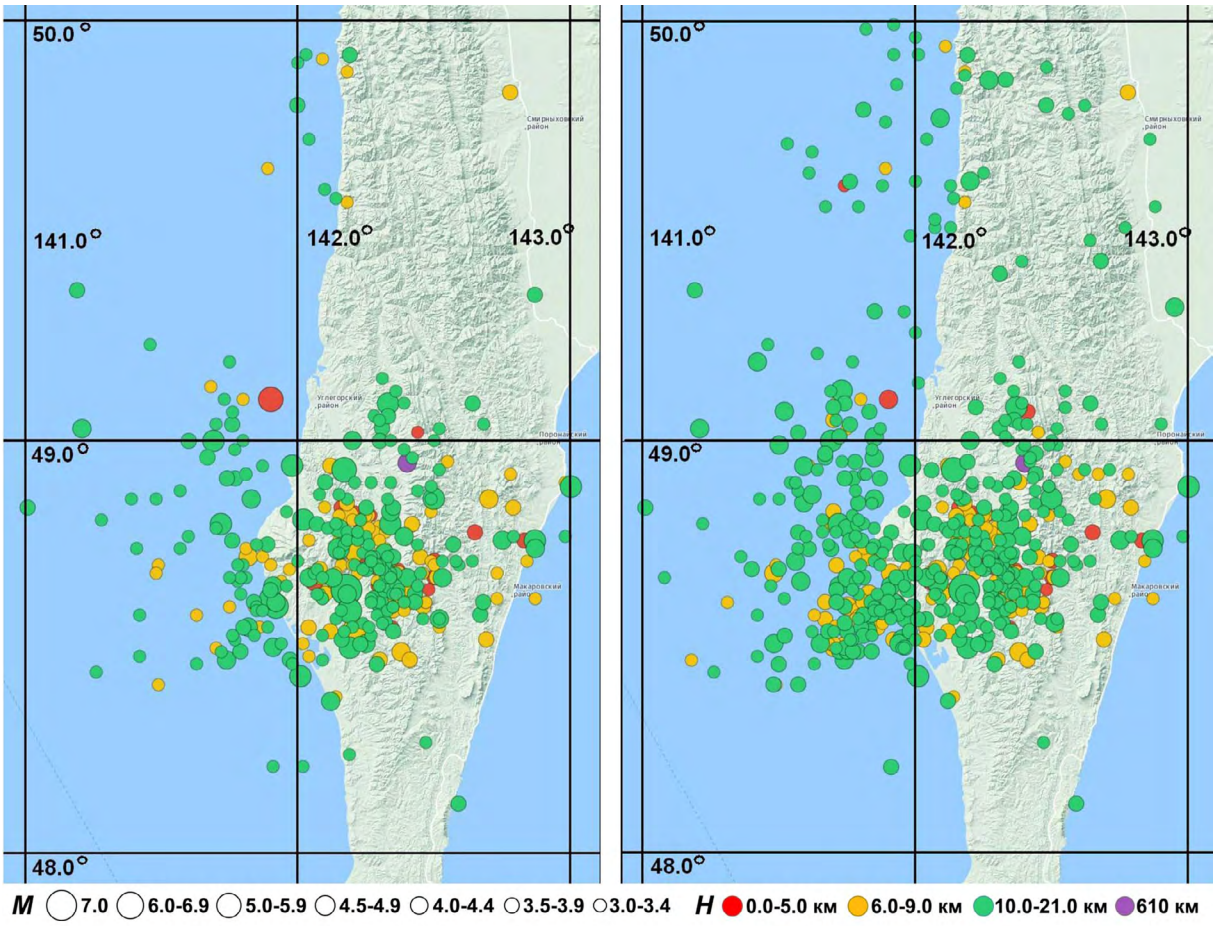

Рис. 1. Распределение эпицентров землетрясений в расчетной области по данным каталогов № 1 (слева) и № 2 (справа) за период с 1997 по 2005 г.

времени в одной и той же области. Подавляющее большинство землетрясений в целом располагается в интервале глубин 10–15 км, за исключением одного землетрясения с глубиной 610 км, которое присутствует в обоих каталогах. В интервале глубин от 3 до 10 км, по данным обоих каталогов, сейсмическая активность снижена.

Сравнение данных по двум каталогам указывает на ограниченность регионального каталога землетрясений о. Сахалин [Поплавская и др., 2006] не только в количественном отношении, что наглядно представлено на картах эпицентров, но и в оценках энергетических величин сейсмических событий, которые, вероятно, выполнены в различных магнитудных шкалах. В данной ситуации проверка расчета путем сравнения с результатами по выборке из второго каталога крайне важна. В дальнейшем использование данных каталога № 1 нежелательно.

Результаты

Графики параметра LURR, построенные по двум каталогам для одной и той же расчетной зоны, в целом идентичны, и, что самое главное – аномалия перед Углегорским землетрясением отмечена в одно и то же время на обоих графиках (рис. 2). Это важно также и в связи со значительными различиями данных каталогов по количеству землетрясений и положению эпицентров. В феврале 2000 г., за 6 мес. до землетрясения, наблюдается характерный рост параметра в несколько раз и затем достаточно быстрый спад.

На рис. 3 показан график параметра LURR для событий с 1997 по 2019 г. по каталогу № 2. Как видно из графика, за 22 года кроме аномалии перед Углегорским событием были отмечены еще три значимые вариации, которые также определены как аномалии параметра. Это вариации в апреле 2008,

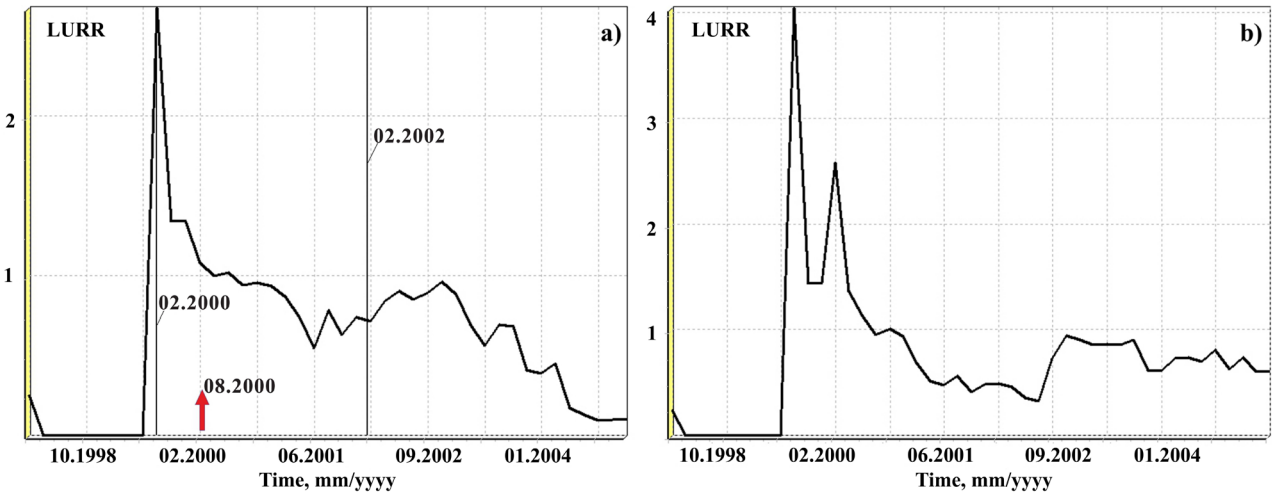

Рис. 2. Параметр LURR в расчетной области с координатами 48.0–50.0° с.ш. и 141.0–143.0° в.д. в период с 1997 по 2005 г. по каталогам № 1 (a) и № 2 (b). На левом графике для примера линиями показаны моменты начала тревоги (аномалия) и ее завершения, стрелкой – время Углегорского землетрясения.

в ноябре 2014 и в феврале 2019 г. Последняя из них указывает на период тревоги минимум до февраля 2021 г., что можно оценить как оперативный прогноз. В настоящее время такие же оценки получены для территории южнее рассматриваемой в данной статье области, и тоже в районе Центрально-Сахалинского разлома [Закупин, Богинская, 2019]. В аномалиях 2008 и 2014 гг. несложно узнать аномалии перед Уангским и Онорским землетрясениями, рассчитанные ранее по каталогу ИМГиГ ДВО РАН [Закупин и др., 2018]. Наша расчетная зона (48.0–50.0° с.ш. и 141.0–143.0° в.д.) находится примерно на 200 км южнее эпицентра Уангского землетрясения, но при этом аномалия статистически значима, как и аномалия Онорского землетрясения, эпицентр которого в 4 раза ближе к расчетной зоне. Ранее по каталогу ИМГиГ ДВО РАН мы получили максимальный по уровню признак для Уангского землетрясения практически рядом с его эпицентром. Теперь же получили более отчетливое выражение признака на значительно большем расстоянии от эпицентра. Аномалия для Онорского землетрясения сопоставима с той, что выявлялась в предыдущих расчетах [Закупин и др., 2018], однако там расчетная зона была сильно удалена от эпицентра будущего землетрясения.

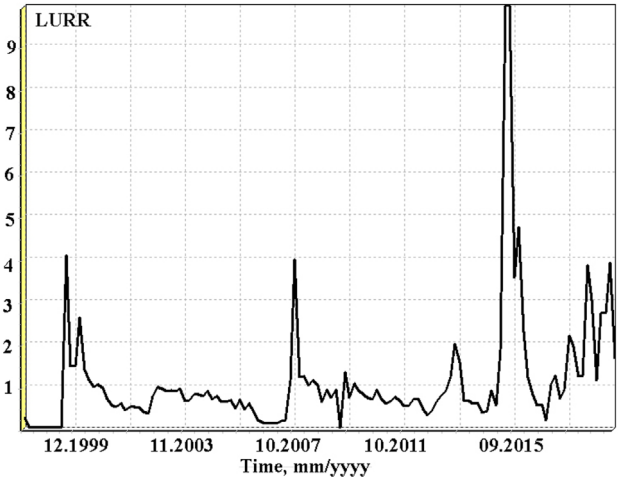

Рис. 3. График параметра LURR на период с 1997 по 2019 г. по данным каталога № 2 в расчетной области с координатами 48.0°–50.0° с.ш. и 141.0°–143.0° в.д.

Для проверки по каталогу № 2 было проведено сканирование (перебор областей-эллипсов) с 48.0° по 52.0° с.ш. Выявлено, что максимальных значений аномалии достигают в эллипсах, чьи центры близки к эпицентрам соответствующих землетрясений (рис. 4 a, b). Также отметим, что аномалия LURR перед Углегорским землетрясением незначительно усиливается в зоне-эллипсе, чей центр совпадает с эпицентром Онорского землетрясения (севернее самого Углегорского события на 1°), но полностью исчезает при дальнейшем смещении зоны на север, это можно увидеть в зоне с центром, совпадающим с эпицентром Уангского землетрясения. При этом в зоне влияния Уангского прогнозного признака (рис. 4 b) уровень аномалии перед Онорским событием практически не ослабевает. Фактически аномалия Углегорского землетрясения выявлена на территории, ограниченной координатами 48.0°–51.0° с.ш. и 141.0°–143.0° в.д.

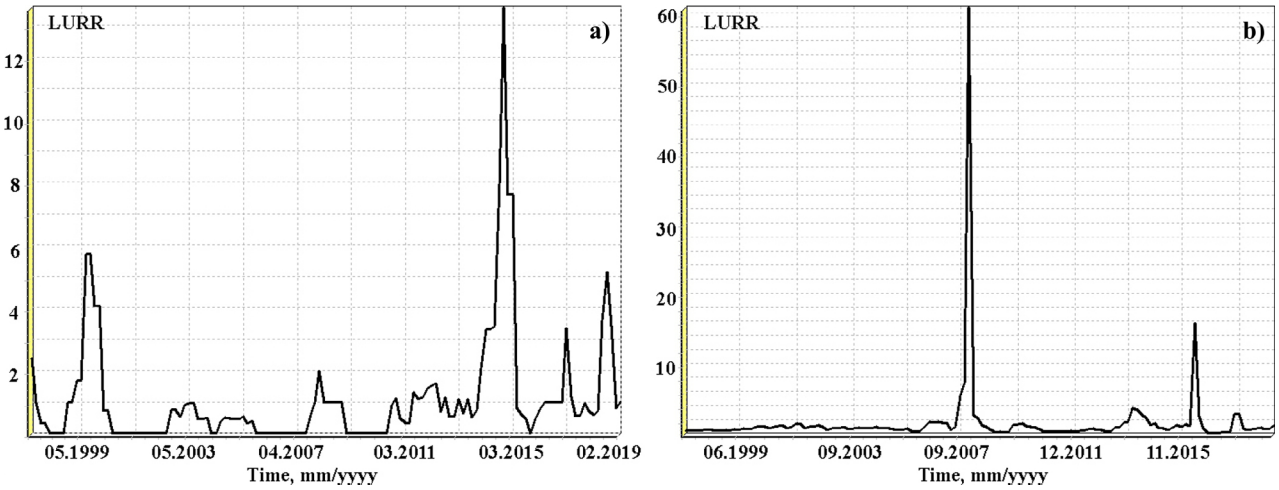

Рис. 4. Расчеты параметра LURR по каталогу № 2 в областях, центры которых совпадают с эпицентрами Онорского (a) и Уангского (b) землетрясений.

Посмотрим, изменились ли прогнозные оценки по Уангскому и Онорскому землетрясениям после проведения альтернативных расчетов по каталогу № 2 по сравнению с каталогом ИМГиГ ДВО РАН. На рис. 5 a показана карта с расчетными областями, где были отмечены максимальные значения аномалий, для этих двух каталогов, а также эпицентры землетрясений. На карте видно, что лучшее согласование наблюдается для каталога № 2.

Для улучшения восприятия масштаб приведен к единому времени (с 2006 г.) и на рис. 5 b–e показаны аномалии LURR для обоих событий по двум каталогам. Время появления аномалий различается незначительно, а вот позиция зон в пространстве для каталога № 2 сближается с эпицентрами землетрясений. Также отметим, что в целом (а для Уангского землетрясения особенно) максимальные значения аномалий возрастают. Время появления аномалии по Уангскому землетрясению сдвинулось назад с октября до апреля 2008 г., а по Онорскому, напротив, продвинулось вперед с июля до ноября 2014 г. Незначительные колебания во времени появления аномалий не нарушили «сахалинской» статистики, и среднее время ожидания по всем сахалинским землетрясениям по-прежнему не превышает двух лет. Значительное улучшение качества оценок сейсмической опас-

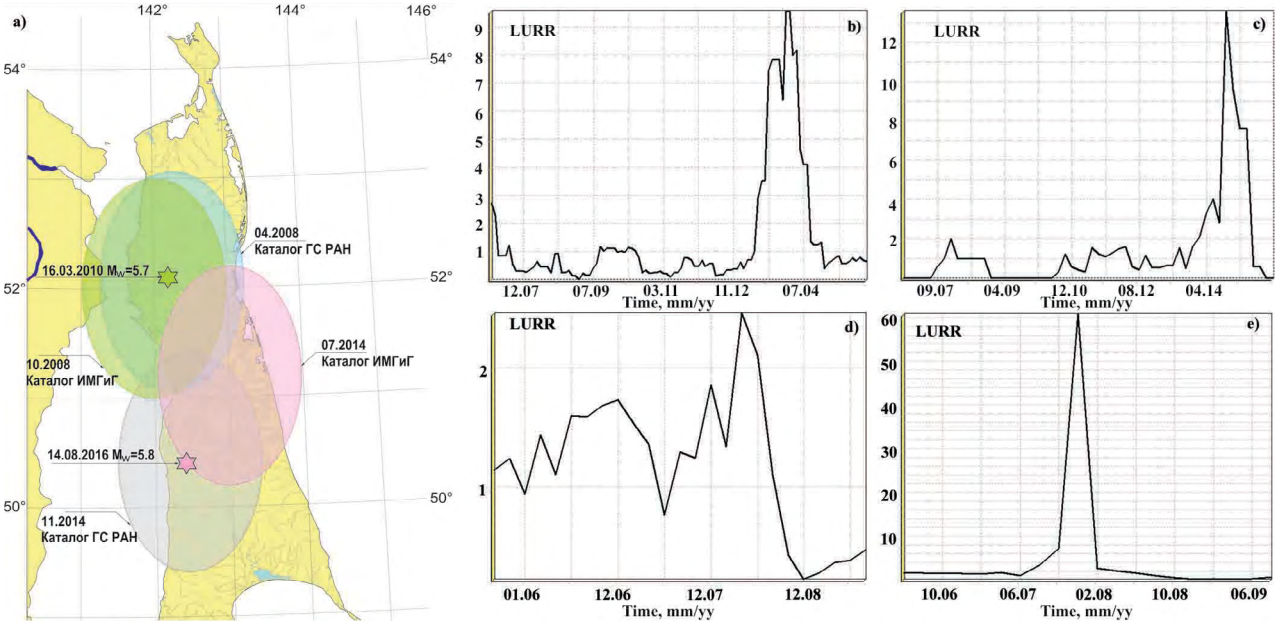

Рис. 5. Карта с расчетными зонами (a), где отмечены аномалии LURR по каталогам ИМГиГ ДВО РАН и № 2 для Онорского (графики b и c соответственно) и Уангского (графики d и e соответственно) землетрясений.

ности для этих двух землетрясений по каталогу № 2, несомненно, может положительно характеризовать качество данных.

Таким образом, привлечение к расчетам новых данных (каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН) позволило не только установить ретроспективный предвестник Углегорского землетрясения (и вычеркнуть событие из списка пропущенных), но и улучшить результаты по близким (по времени и положению) событиям, которые были рассмотрены ранее.

Оценку эффективности метода LURR после новых результатов проведем по известной методике [Гусев, 1974]. Если по конкретному методу прогноз выдается для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона, то эффективность J можно определить по следующей формуле:

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

где N_{+} – количество «ожидаемых» землетрясений, т.е. соответствующих успешному прогнозу, N – общее количество произошедших землетрясений с параметрами (местоположение и энергия), соответствующими прогнозу, T_{alarm} – общее время тревоги, т.е. суммарная длительность всех прогнозов, T – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу. Эффективность J показывает, во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число попавших в общее время тревоги случайным образом. Очевидно, что при случайном угадывании эффективность J равна 1. Так вот, в нашем случае при $N = 8$ (если учитывать и Крильонское землетрясение с M = 5), успешных прогнозных оценок (включая ретроспективные) было $N_{+} = 7$. Общий период наблюдений составил 264 мес. (1995–2017 гг.), а время тревоги, суммированное по 7 случаям, – 93 мес. В итоге показатель J оказался равен 2.48 (против 2.28 до включения данных по Углегорскому землетрясению). Это значение превышает среднестатистические показатели по краткосрочным методам (в основном на базе аномалий геофизических полей) более чем в два раза [Чебров и др., 2013].

Заключение

Результаты расчетов параметра LURR по «Региональному каталогу землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.» и каталогу СФ ФИЦ ЕГС РАН указали на существование в центральной части Сахалина зоны с аномалией в феврале 2000 г., которая была предвестником для Углегорского землетрясения (август 2000 г.). Кроме того, показано, что «опасные зоны» в пространстве для Уангского и Онорского землетрясений (их эпицентры соседствуют с Углегорской расчетной зоной) определены по каталогу ИМГиГ ДВО РАН (период наполнения 2006–2016) с худшей точностью (отклонения до 1°), чем при использовании каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Успешный ретроспективный расчет параметра LURR перед Углегорским землетрясением можно добавить к общему количеству среднесрочных оценок сейсмической опасности на о. Сахалин этим методом. За последние тридцать лет таких прогностических оценок для землетрясений с магнитудой выше 5.5 (нижний предел, установленный авторами для Сахалина в методе LURR) сделано 6 (в том числе оперативный прогноз Онорского землетрясения в 2016 г.), притом что реальных событий, отвечающих этому условию, произошло 7. Еще один успешный прогноз методом LURR для Крильонского землетрясения (Mw = 5.0) в реальном времени был сделан в 2017 г., но он выбивается из общей статистики прогнозов землетрясений Сахалина тем, что магнитуда оказалась по факту меньше ожидаемого значения.

На сегодняшний день результаты, полученные методом LURR, на наш взгляд, не имеют аналогов среди других методов по степени эффективности получаемых оценок. Метод, несомненно, будет востребован для среднесрочных оценок сейсмической опасности на о. Сахалин в дальнейшем. Принципиально возможны детальные исследования в других сейсмоактивных регионах, тем более что отдельные успешные оценки уже имели место в нашей практике ранее (по сейсмическим данным Новой Зеландии [Закупин, Каменев, 2017] и Непала [Закупин, Жердева, 2017]).

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., Богинская Н.В. **2019.** Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? *Геосистемы переходных зон,* 3(1): 27–34. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034

3. Закупин А.С., Жердева О.А. **2017.** Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для северного Сахалина. *Вестник ДВО РАН*, 1: 18–25.

4. Закупин А.С., Каменев П.А. **2017.** О возможности пространственно-временной локализации повышенной сейсмической опасности в методике среднесрочного прогноза LURR (на примере Новой Зеландии). *Геосистемы переходных зон*, (3): 40–49.

5. Закупин А.С., Семенова Е.П. **2018.** Исследование процесса подготовки сильных землетрясений (Mw > 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

6. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018.** Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине (Mw = 5.8, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика,* 11: 1904–1911. https://doi.org/10.15372/gig20181112

7. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. **2020.** Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, 19(1): 66–78. https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4

8. 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. **2006.** *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.

9. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. **2019**. Сахалин. *Землетрясения Северной Евразии*, 22 (2013 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 173–183. doi:10.35540/1818-6254.2019.22.15

10. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. **2013**. Опыт выявления предвестников сильных (M ≥ 6.0) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС. *Вулканология и сейсмология*, 1: 85–95.

11. Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottemoller L. **2014.** New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data. *Seismic Instruments*, 50(1): 67–74. https://doi.org/10.3103/s0747923914010083

12. Yangde F., Ji G., Wenkai C. **2012**. Parallel computing for LURR of earthquake prediction. *International J. of Geophysics*, 2012: Article ID 567293, 3 p. https://doi.org/10.1155/2012/567293

13. Yin X., Yin C. **1991.** The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.

14. Yin X.C., Chen X.Z., Song Z.-P., Yin C. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. In: *Mechanics problems in geodynamics*, pt 1: 701–715. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9065-6_17

15. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2000.** 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

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