

Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз?

© 2019 А. С. Закупин*, Н. В. Богинская

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

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

Изучена сейсмичность территории о. Сахалин, охватывающей южный сегмент Центрально-Сахалинского разлома за период 2015–2018 гг. Анализируются временные зависимости сейсмической активности и параметра LURR (*load/unload response ratio*), выявлены периоды этих изменений. Также проведен анализ изменений углового коэффициента графика повторяемости, обнаружен период аномально низких значений в 2011–2012 гг. Оценки соответствия последовательности событий с моделью саморазвивающихся процессов (СРП), используемой при составлении прогнозов землетрясений на Сахалине, проведены в связи со значительной активизацией сейсмичности на исследуемом сегменте в 2017 г.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, каталог землетрясений, разлом.

Modern seismicity in the area of the Central Sakhalin fault (south of Sakhalin Island): false alarm or postponed prediction?

Aleksander S. Zakupin, Nataliya V. Boginskaya*

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

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

Seismicity in the territory of Sakhalin Island, covering the southern segment of the Central Sakhalin fault for the period 2015–2018, has been studied. The time dependence of seismic activity and LURR (*load/unload response ratio*) have been analyzed, the periods of parameters changes have been revealed. The analysis of changes in the angular coefficient of the recurrence graph is also carried out, the period of abnormally low values in 2011–2012 is found. Estimates of compliance of the sequence of events with the model of self-developing processes (SDP) used in the preparation of earthquake predictions on Sakhalin have been carried out in connection with a significant increase in seismic activity in the studied segment in 2017.

Keywords: seismicity, seismic events, LURR method, earthquakes catalog, fault.

Материал и методы

Актуальность исследования сейсмичности на Сахалине трудно переоценить. Сахалинская область располагается в пределах северо-западной части так называемого Тихоокеанского «огненного кольца» и потому является одним из наиболее сейсмоопасных регионов России. Особенно важно изучение сейсмичности южной части Сахалина, где

плотность населения самая большая, а населенные пункты, в том числе областной центр Южно-Сахалинск, расположены вблизи активных разломов.

В последние несколько лет на Сахалине сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН достигнуты значительные успехи в области среднесрочных оценок по основным сейсмическим зонам острова с умеренным потенциалом

($M = 6-7$). В качестве основного используется метод среднесрочного прогноза сейсмической опасности LURR [Yin et al., 2001]. На примере Сахалина, Непала и Новой Зеландии ретроспективно продемонстрирована возможность прогноза сильных сейсмических событий с задержками, не превышающими нескольких лет [Закупин и др., 2018; Закупин, Каменев, 2017]. Используемый подход позволил перейти к оперативной оценке сейсмической опасности и сделать два официальных прогноза [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018], которые рассматривались на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (протокол № 3 от 11.05.2016, протокол № 2 от 16.03.2017). Оба прогноза были признаны реализованными с небольшими (не более 50 км) отклонениями по месту очага и полностью соответствующими наблюдаемым значениям по времени и магнитуде [Закупин и др., 2018]. С 2017 г. в дополнение к LURR применяется метод СРП (метод саморазвивающихся процессов), разработанный А.И. Малышевым (ИГиГ УрО РАН) и адаптированный к данным наблюдений в различных сейсмоактивных регионах [Тихонов, Закупин, 2016; Тихонов и др., 2017]. Данная методика позволяет строить адекватные модели сейсмического процесса на основе нелинейного дифференциального уравнения второго порядка, названного уравнением саморазвивающихся процессов. При этом, несмотря на то что заблаговременность прогноза времени возникновения землетрясений в ретроспективе составляет сутки или часы, а в реальном времени таких прогнозов пока еще нет, авторы надеются использовать этот метод для улучшения данных по прогнозу методом LURR. В работе [Levin et al., 2018] авторы обратили внимание на неблагоприятную сейсмическую обстановку в районе Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР) на о. Сахалин по итогам анализа данных с 2015 по 2017 г. с помощью обозначенных методов. Отмечалось, что существует опасность реализации землетрясения с магнитудой более 5, но менее 6 в течение 2018 г. В начале 2019 г. завершается период этих среднесрочных

оценок, поэтому есть основание для подведения предварительных итогов по результатам предыдущих работ (и прогноза) с учетом обновленных сейсмических данных.

С этой целью в настоящей работе используются данные локальной сети автоматизированных цифровых сейсмических станций Сахалинского филиала Федерального информационного центра Единой геофизической службы РАН (СФ ФИЦ ЕГС РАН). На основе данных мониторинга этой локальной сетью создан и регулярно пополняется детальный каталог землетрясений с $M \geq 2.0$. Данные локальной сети использованы для оценки сейсмической обстановки и расчетов по методу LURR и СРП. Для построения графика повторяемости для периода с 1971 по 2005 г. применялся также каталог землетрясений о. Сахалин за 1905–2005 гг. [Региональный..., 2006].

Задача моделирования сейсмического потока до и после сильных землетрясений в методе СРП решается на основе уравнения саморазвивающихся процессов [Малышев, 1991]. Если динамика нелинейного сейсмического процесса имеет значительные отклонения от стационарного состояния ($dx/dt \gg (dx/dt)_0$), то в этом частном случае уравнение саморазвивающихся процессов решается аналитически. Его решения имеют квазилинейную форму: они либо представляют собой собственно линейную зависимость, либо сводятся к линейным зависимостям при логарифмировании. Все эти аспекты заложены в программном комплексе SeisDynamicsView. В работе [Tikhonov, Kim, 2010] метод СРП применялся для предсказания Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. В рамках данного метода были получены удовлетворительные результаты.

По методу LURR применялся разработанный в ИГиГ ДВО РАН [Закупин, 2016] запатентованный программный комплекс Seis-ASZ, использованный в работах [Тихонов, Закупин, 2016; Закупин, 2016]. Расчеты LURR проведены с выбором стандартных для наших вычислений параметров: окно 360 дней, сдвиг 30 дней, диапазон магнитуд 3.3–5.

Результаты

Весь сегмент ЦСР и результаты расчета 2017 г. рассмотрены в работе [Levin et al., 2018]. Исследуемая нами зона локализована (рис. 1а) в районе Тымь-Поронайского (Центрально-Сахалинского) и Апрельовского разломов в пределах 46.4° – 47.4° с.ш. и 142.2° – 142.4° в.д. Потенциал в данной сейсмогенерирующей зоне (СГЗ) по инструментальным данным оценивается до $M_w = 6.0$ (по палеоданным это $M_w = 7.0$ с повторяемостью до 600 лет), при этом прогнозные оценки по методу LURR относятся к событиям выше $M_w = 5.5$. Последнее сильное землетрясение в этой зоне произошло сравнительно давно (категория – Анивские землетрясения, 1951 год, $M_w = 5.5$). Анализ исторических данных по нашим оценкам указывает, что средний период повторяемости землетрясений Сахалина на различных участках ЦСР с $M < 6$ составляет 50 ± 7 лет. Однако если в зоне «Анивских» землетрясений событий с такой магнитудой не было с 1951 г., то в средней части сегмента в 2001 г. (47° с.ш.) произошло Такойское землетрясение, магни-

туда которого, по данным разных источников, варьирует от 5.2 до 5.5. Если учитывать эти части сегмента (рис. 1а) как единое целое, то это как раз спустя 50 лет после 1951 г. В то же время в зоне «Анивских» землетрясений в 1964 г. также было зафиксировано землетрясение с $M = 5.0$, и можно предположить, что подобное могло бы произойти в интервале 50 лет, т.е. начиная с 2015 г. (с погрешностью до нескольких лет).

С учетом данных за 2018 г. и уточнения каталога за 2017 г. были построены новые зависимости. При этом нужно отметить, что алгоритм выделения зоны неправильной геометрической формы был существенно доработан и в настоящее время не допускает ошибки в сепарации событий, в отличие от аналога годичной давности. В этом кроется причина изменений в графике LURR (рис. 1б), где появившаяся в апреле 2016 г. аномалия не выходит на пик в конце 2016, а достаточно быстро заканчивается.

В результате проведения новых расчетов за период с 2015 по 2018 г. (рис. 1а) на графике LURR для апреля 2018 г., т.е. спустя 2 года

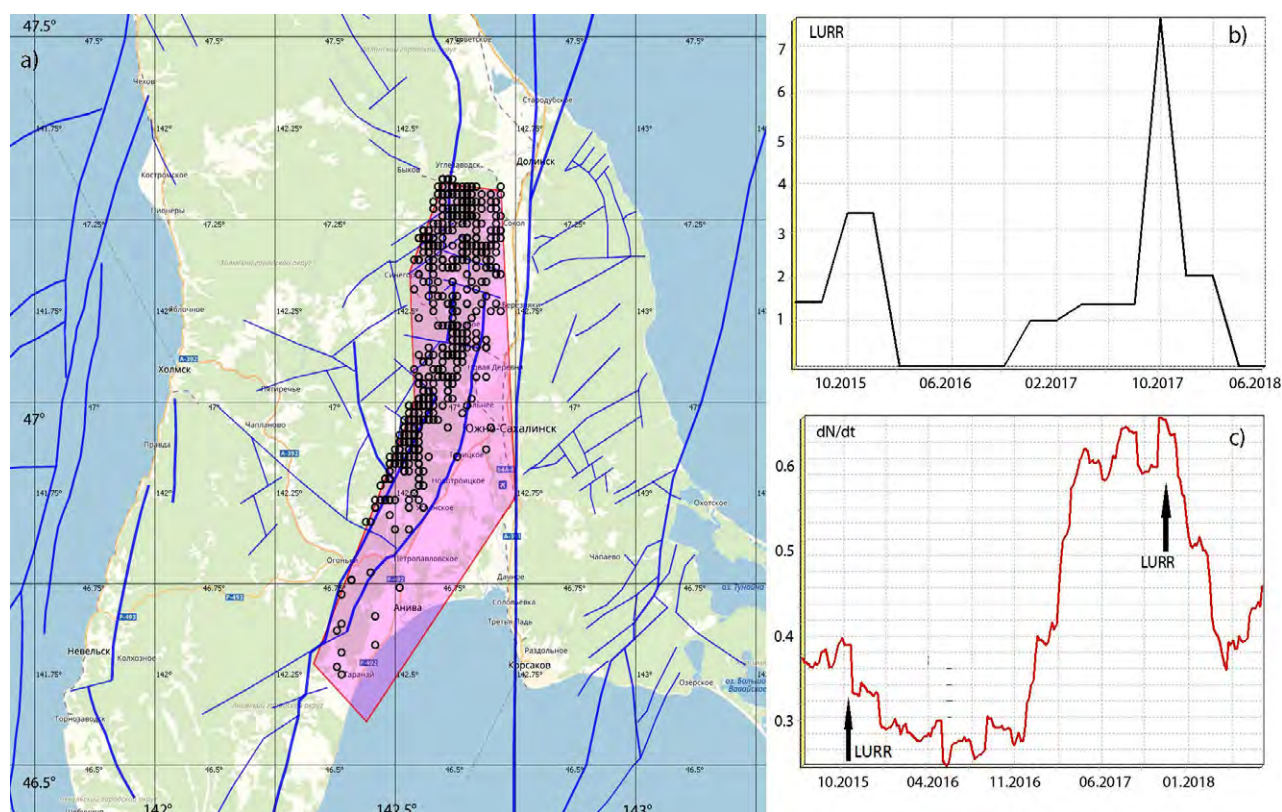


Рис. 1. Для исследуемого сегмента ЦСР показаны: а) карта с распределением сейсмических событий с 2015 по 2018 г., б) распределение значений параметра LURR, в) сейсмическая активность (dN/dt).

после аномалии 2016, была выявлена еще одна аномалия, которая к тому же оказалась больше предыдущей (рис. 1b).

График активности за данный период демонстрирует достаточно неоднозначную картину. С одной стороны – появление первой аномалии LURR соответствует началу периода с низким уровнем активности (рис. 1c), что соответствует переходу процесса разрушения в очаговой зоне в неупругую стадию деформирования (энергия меньше рассеивается через хрупкое разрушение – классические землетрясения). Также в рамках подхода и то, что следующей стадией может стать разрушение в очаговой области, что отражается в резком росте количества землетрясений (форшоков) и приводит к главному событию. Однако, несмотря на то что через некоторое время активность действительно начала резко увеличиваться, этот процесс не завершился в исследуемой зоне землетрясением с ожидаемой магнитудой, а активность оставалась высокой в течение всего 2017 г. Кроме того, вызывает вопросы появление на этом фоне еще одной аномалии LURR. В то же время очередная фаза снижения активности, опять же, была отмечена после нее. В целом имеет

место ситуация, когда аномалии в зоне Западно-Сахалинского (рис. 2 [Закупин, Семенова, 2018]) и Центрально-Сахалинского разломов (рис. 1b) в середине 2016 г. указывали на общую дестабилизацию в южной части острова. Это частично проявилось в апреле 2017 г. землетрясением с $M = 5$ в районе сочленения двух крупнейших разломов [Закупин, Семенова, 2018].

По простиранию афтершокового облака видно (рис. 3), что подвижка произошла в зоне влияния ЦСР, но можно ли считать, что напряжения сняты и в зоне нашего сегмента (севернее), т.е. оценить Крильонское землетрясение как подобное Анивскому 1964 г.? Такое предположение имеет место, но тогда какое прогнозное значение имеет вторая аномалия LURR? На этот вопрос пока ответить невозможно, но мониторинг данной области в ближайшие два года необходим.

К настоящему времени в районе исследования происходит такой же резкий рост сейсмической активности, как и в начале 2017 г. Посмотрим на активность сейсмичности с позиции метода СРП (рис. 4).

Из 4-летнего тренда на графике накопления периодов (аналог сейсмической актив-

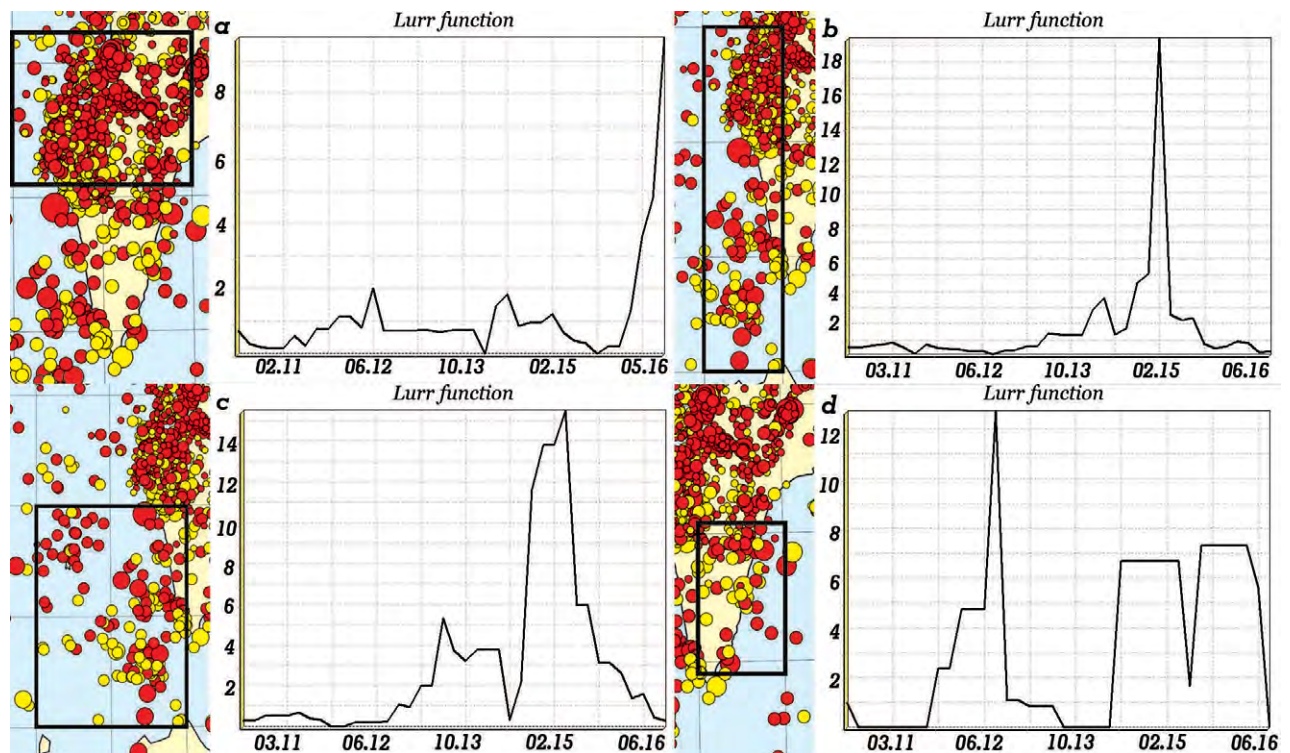


Рис. 2. Результаты расчетов LURR для областей в районе Крильонского землетрясения 23.04.2017 [Закупин, Семенова, 2018].

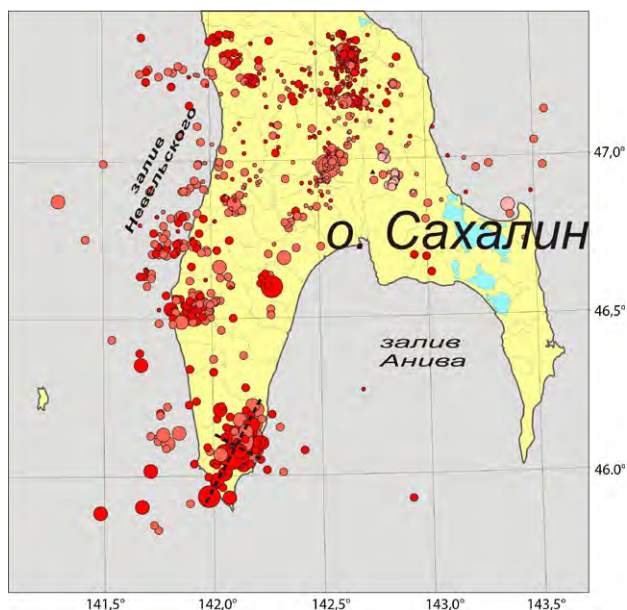


Рис. 3. Карта распределения сейсмических событий с эпицентром землетрясения 23 апреля 2017 г. с областью афтершоков по данным локальной сети полевых станций южного Сахалина.

ности) видно, что во время появления первой аномалии LURR в целом преобладал релаксационный процесс, который в начале 2017 г. постепенно перешел в режим с ускорением. Расчет на этом участке проводить нет смысла при любой ситуации – ложная ли это тревога или действительно данная аномалия связана с Крильонским событием. И понятно почему – в первом случае прогноз уже не реализуется, так как есть новый СРП, а во втором случае (что видно из графика) решение удастся получить в лучшем случае к середине 2017 г., что уже много позднее самого Крильонского события и рассматривается опять же как ложная тревога (уже для СРП). Рассмотрим уча-

сток *a* на рис. 4А, где после второй аномалии LURR практически сразу формируется СРП с решением на 06.10.2018 (рис. 4В). Что еще интереснее, данная активация, практически не входя в процесс релаксации и замедления, вновь обостряется, причем можно получить уже новое решение (рис. 4С), начиная с ноября 2018 г., в точке 28.12.2018.

Завершить данное исследование предлагаем анализом графиков повторяемости землетрясений. В ряде работ исследователи пытались оценить изменения сейсмического режима по данному параметру, в том числе и при подготовке сильных землетрясений [Соболев, 1993; Завьялов, 2006; Коновалова, Салтыков, 2008; Ким, 2009]. Рассматриваемая зона практически идентична (специально подобрана) зоне очагов возможных землетрясений D3 сеймотектонической модели ИМГиГ-2007 [Левин и др., 2012]. Для данной зоны сейсмологами ИМГиГ в 2007 г. были построены графики повторяемости за период 1910–2005 гг. по каталогу [Региональный..., 2006]. Причем были использованы различные методы декластеризации [Gardner, Knopoff, 1974; Reasenber, 1985; Uhrhammer, 1986], которые в итоге дали очень большой разброс в значениях угла наклона *b*-value (от 0.75 до 0.97). Для событий с $M > 3$ это, надо признать, большая погрешность, притом что после декластеризации количество землетрясений в выборке уменьшается (по разным методам) в 2–5 раз. Учитывая такую реальную субъективность (при сравнительно общих принципах процесса декластеризации), мы провели

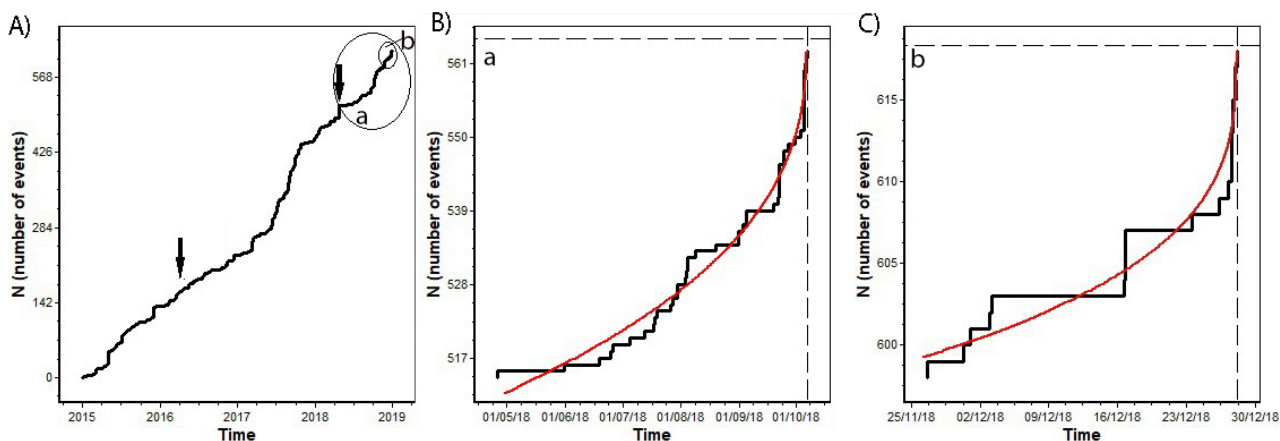


Рис. 4. Общий график накопления периодов землетрясений в сегменте с 2015 по 2018 г. (А), решение СРП для области *a* (В), решение СРП для области *b* (С). Стрелками обозначены моменты появления аномалий LURR.

оценки без использования программ декластеризации. В качестве исторического периода был взят тот же каталог [Региональный..., 2006], но с 1971 по 2005 г. (как более представительный и отсекающий «Анивские» землетрясения 1951 и 1964 гг.). Для постро-

ения графика современного периода с 2007 по 2018 г. был взят каталог локальной сети юга Сахалина с $M > 2$. Этот период был разбит на короткие промежутки (не более 2 лет с погрешностью не более 0.02). Оценка максимального правдоподобия параметров Гу-

Параметры графиков повторяемости и выборки для их расчета

Период, представительность	Количество событий	Оценка максимального правдоподобия параметров Гутенберга–Рихтера		Средняя глубина гипоцентров, км	Максимальная магнитуда по каталогу, M_w
		a	b		
1971–2005, $M > 3$	124	4.67 ± 0.054	0.73 ± 0.016	8	5.2
2007–2018, $M > 2$	354	4.40 ± 0.008	0.77 ± 0.004	8	4.5
2007–2010, $M > 2$	173	4.23 ± 0.021	0.85 ± 0.008	8	4.1
2009–2012, $M > 2$	75	3.37 ± 0.033	0.61 ± 0.014	9	4.5
2011–2014, $M > 2$	76	3.40 ± 0.016	0.57 ± 0.006	10	4.5
2013–2016, $M > 2$	100	3.90 ± 0.016	0.77 ± 0.007	9	4.2
2015–2018, $M > 2$	105	3.90 ± 0.019	0.78 ± 0.008	7	4.0
2011–2012, $M > 2$	18	2.41 ± 0.048	0.35 ± 0.016	8	4.5

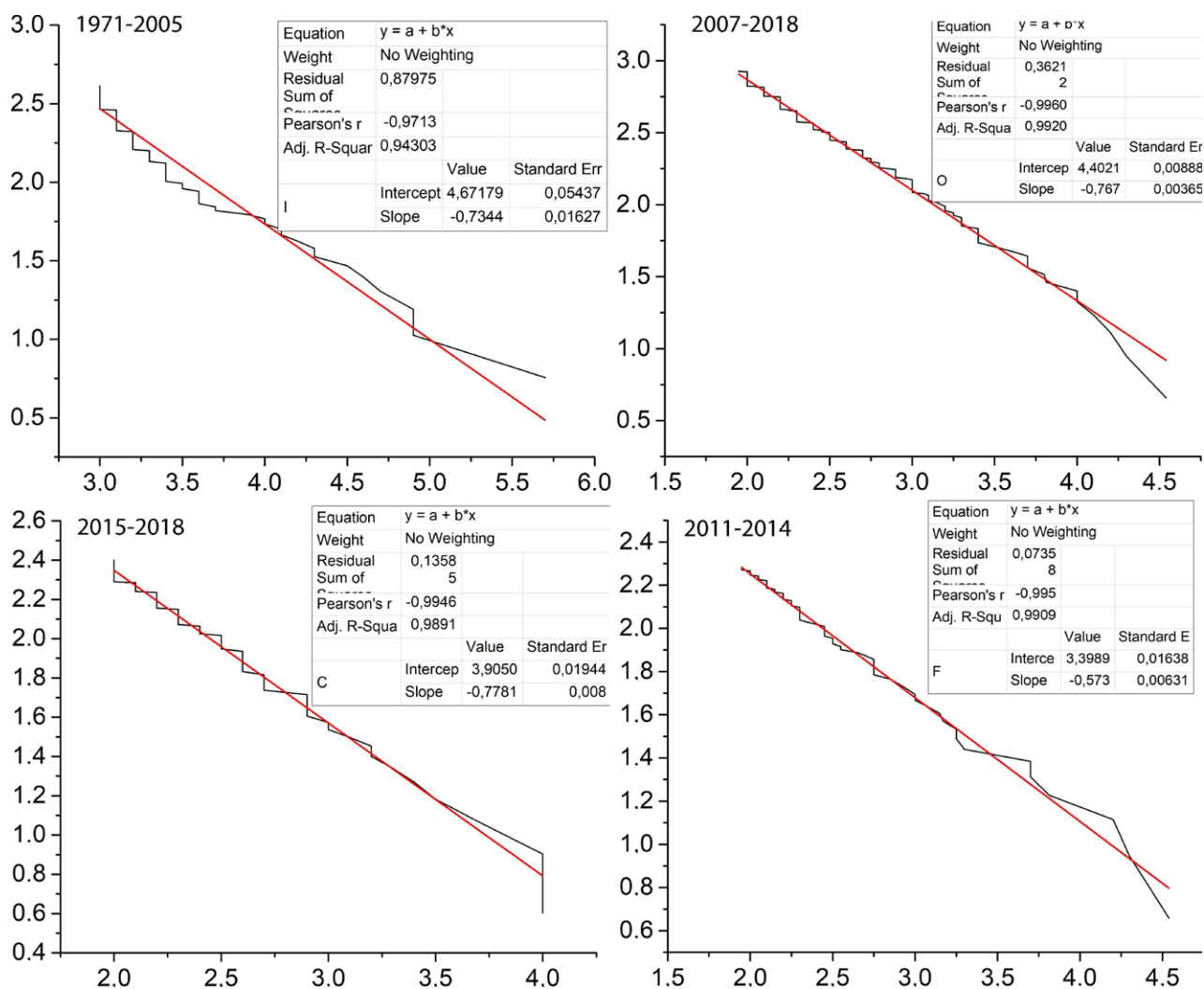


Рис. 5. Графики повторяемости с решениями для линейной аппроксимации и значениями углов наклона для сегмента ЦСР (аналогичен зоне D3) в разные периоды времени.

тенберга–Рихтера проведена линейной аппроксимацией в пакете Microsoft OriginPro 2015. Данные представлены в таблице, а примеры на рис. 5.

Как видно из таблицы, данные двух каталогов дают практически один и тот же результат, что может считаться показательным для расчета графика повторяемости без декластеризации в отсутствие длительных афтершоковых серий. А вот разбор периода с 2007 по 2018 г. на короткие периоды дал интересный результат. Расчеты показали, что по совокупности данных получить адекватную модель можно на периодах не менее двух лет. При этом оценки различных периодов указывают, что значение *b*-value было аномально низким в период с 2011 по 2012 г., в остальные же промежутки оно уверенно держалось вблизи общего среднего примерно 0.75. Отметим, что в эти два года в исследуемом районе было очень мало событий, особенно слабых, так что результат расчета неудивителен.

В этих же средних значениях (0.75) значение *b*-value находится и сейчас (по данным за 2017–2018 гг.). При анализе сахалинской сейсмической обстановки в аномальный период (2011–2012 гг.) было отмечено лишь Тымовское землетрясение в декабре 2011 г. ($M_w = 5.1$). Однако, во-первых, это далеко от рассматриваемого сегмента, а во-вторых, сложно представить, что землетрясение с такой магнитудой могло бы влиять на землетрясения с $M > 3.5$ на расстоянии в несколько сот километров (рост числа которых и обеспечил снижение *b*-value). Кроме того, это все-таки уже почти 2012 г. В то же время нельзя не вспомнить мегаземлетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. ($M_w = 9.0$), которое могло оказать влияние на региональную сейсмичность. Такая реакция сейсмичности в районе ЦСР на удаленное землетрясение вполне допустима, однако требует дополнительного изучения, что не входит в задачи данного исследования.

Заключение

При анализе сейсмичности в области, охватывающей южный сегмент Центрально-Сахалинского разлома, обнаружено, что в

период активизации слабых и умеренных событий в 2017 г. имел место и кратковременный рост параметра LURR, который может играть роль среднесрочного предвестника. Однако это наблюдалось при уже имеющемся в данной области признаке (по состоянию на 2016 г.). Ни в 2018, ни в начале 2019 г. главного (ожидаемого) события не произошло, и, таким образом, этот метод прогноза впервые дал «ложную тревогу» на территории Сахалина. Ранее в серии работ, посвященных применению метода LURR, было сделано шесть успешных прогнозов времени землетрясений на Сахалине, в том числе в квазиреальном времени два (остальные ретроспективно). Объяснение «ложной тревоги» может быть связано с тем, что с начала 2019 г. отмечен новый рост сейсмической активности на рассматриваемом участке. Этот рост соответствует модели саморазвивающихся процессов, а полученные устойчивые решения указывают на ожидаемое землетрясение с магнитудой 5.5–6 в период до 2020 г. в пределах сегмента или на расстоянии до 50 км от него.

Список литературы

1. Завьялов А.Д. *Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация*. М.: Наука, 2006. 254 с.
2. Закупин А.С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса = [Zakupin A.S. Program complex for the analysis of instability of seismic process] // *Геоинформатика*. 2016. № 1. С. 34–43.
3. Закупин А.С., Каменев П.А. О возможности пространственно-временной локализации повышенной сейсмической опасности в методике среднесрочного прогноза LURR (на примере Новой Зеландии) // *Геосистемы переходных зон*. 2017. № 3. С. 40–49. <http://dx.doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.040-049>
4. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Оморского землетрясения на Сахалине ($M_w=5.8$, 14 августа 2016 года) // *Геология и геофизика*. 2018. № 11. С. 1904–1911. <https://doi.org/10.15372/gig20181112> [Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. 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*, 2018, 59(11): 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012>]

5. Закупин А.С., Семенова Е.П. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ($M_w > 5$) на Сахалине методом LURR // *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2018. № 5. С. 73–88. [Zakupin A.S., Semenova E.P. Study of the process of preparation of strong earthquakes ($MW > 5$) on Sakhalin using the LURR method. *Bull. KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 2018, 5: 83-98. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>]
6. Ким Ч.У. *Теоретико-методологические особенности оценки сейсмической опасности в условиях окраинных островных структур (на примере территории Сахалинской области)*: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009.
7. Коновалова А.А., Салтыков В.А. Различие в наклоне графика повторяемости независимых землетрясений и афтершоковых последовательностей // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2008. № 1, вып. 11. С. 74–81.
8. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // *Тихоокеан. геология*. 2012. Т. 31, № 5. С. 93–103. [Levin B.V., Kim Ch. U., Solovjev V.N. A seismic hazard assessment and the results of detailed seismic zoning for urban territories of Sakhalin Island. *Russian J. of Pacific Geology*, 2013, 7(6): 455-464. <https://doi.org/10.1134/s1819714013060092>]
9. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // *Вулканология и сейсмология*. 1991. № 4. С. 61–72.
10. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* / Л.Н. Поплавская, А.И. Иващенко, Л.С. Оскорбин и др. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 103 с.
11. Соболев Г.А. *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука, 1993. 313 с.
12. Тихонов И.Н., Закупин А.С. Ретроспективная оценка применимости двухэтапной схемы краткосрочного прогнозирования землетрясений ($M \geq 5$) южного Сахалина по данным детального каталога // *Вестник ДВО РАН*. 2016. № 1. С. 58–67.
13. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения // *Тихоокеан. геология*. 2017. Т. 36, № 1. С. 5–14. [Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 2017, 11(1): 1-10. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010092>].
14. Levin B.W., Sasorova E.V., Zakupin A.S., Kamenev P.A. Local occurrence of the relationship between variations in the Earth's rotation rate and the dynamics of seismicity: Case study of Sakhalin // *Doklady Earth Science*. 2018. Vol. 483, Pt 2. P. 1575–1578. <https://doi.org/10.1134/s1028334x18120188>
15. Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // *Bull. Seismological Society American*. 1974. Vol. 64. P. 1363–1367.
16. Reasenbergs P. Second-order moment of Central California seismicity, 1969–1982 // *J. of Geophysical Research*. 1985. Vol. 90. P. 5479–5495. <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>
17. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevel'sk earthquake (Sakhalin Island, Russia) // *Tectonophysics*. 2010. Vol. 485(1/4). P. 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>
18. Uhrhammer R.A. Characteristics of Northern and Central California seismicity // *Earthquake Notes*. 1986. Vol. 57(1). P. 21.
19. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory // *Pure Applied Geophysics*. 2000. Vol. 157(11/12). P. 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29

Сведения об авторах

ЗАКУПИН Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, ведущий научный сотрудник, БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна, научный сотрудник – лаборатория сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.