

## Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине

© 2019 А. С. Закупин\*, Н. В. Богинская, М. Ю. Андреева

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

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

**Реферат.** Обсуждаются особенности применения метода анализа форшоковых последовательностей СРП (саморазвивающиеся процессы) в Сахалинском регионе. На примере Невельского землетрясения (2007 г.,  $M = 6.2$ ) методом площадного сканирования оценены характеристики активизаций, предшествующих главному толчку. Предложен универсальный подход для оценки сейсмической опасности методом СРП. Выполнены расчеты для каталога слабых землетрясений с магнитудами  $M \leq 3$  и для полного каталога сейсмических событий без ограничений по магнитуде, показано преимущество выборки слабых событий. С целью уменьшения влияния на результаты расчетов релаксационных процессов в очагах землетрясений, предшествующих Невельскому, проведена процедура декластеризации каталога. Установлена связь формирующихся последовательностей с развитием очаговой области и появлением аномальных значений параметра LURR (load-unload response ratio). Получен ряд признаков, по которым в режиме реального времени можно выделить место и время (с точностью до недель) главного события.

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

*Для цитирования:* Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 377–389. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>

## Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin

A.S. Zakupin\*, N.V. Boginskaya, M. Yu. Andreeva

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

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

**Abstract.** The peculiar features of the application of the SDP (self-developing processes) method of foreshock sequences analysis for the Sakhalin region have been discussed. On the example of the Nevel'sk earthquake (2007,  $M = 6.2$ ), the characteristics of activations prior to the main shock have been estimated. Calculations were made for the catalogue of weak earthquakes with magnitudes  $M \leq 3$  and for the complete catalogue of seismic events without limitations on magnitude. Weak events samplings have manifested their advantage. The declustering exerted influence on the results reducing the relaxation effect in the source sites of the earthquakes occurred before the Nevel'sk. The relationship has been established between the SDP sequences progressing in the focal area and the appearance of the LURR (load-unload response ratio) parameter anomaly. A number of indicators have been obtained, which allow the place and time allocation (up to few weeks accuracy) of waiting main event.

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

*For citation:* Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M. Yu. Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin. *Geosystems of Transition Zones*. 2019, vol. 3, N 4, pp. 377–389. (In Russian). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>

## Введение

Ни одна из научных проблем геофизики не вызывала столь бурных дискуссий и полярных мнений, как проблема прогноза землетрясений (ЗЛТ). Существуют разные точки зрения на эту актуальную проблему [Hamilton, 1974; Geller, 1997; Geller et al., 1997; Kagan, 1997; Wyss, 1997; Соболев, 1999; Зубков, 2002; Завьялов, 2006; Arellano-Baeza et al., 2006; и др.]. Основные аргументы ученых-скептиков сводятся к несоответствию результатов в данной области финансовым вложениям в нее, например в Японии. Однако в Японии львиная доля средств вынужденно тратилась на инфраструктуру (создание и эксплуатацию достаточно плотных сетей наблюдений, хранение данных), а не на сами исследования [Swinbanks, 1992]. В то же время имеются примеры успешных прогнозов ЗЛТ в Китае, на Камчатке, на о. Сахалин (землетрясение в Хайчэне 1975 г.,  $M_w = 7.3$ ; [Zhang, Fu, 1981; Wang et al., 2006]; Кроноцкое землетрясение 1997 г.,  $M_w = 7.9$  [Матвиенко, 1998]; Невельское землетрясение 2007 г.,  $M_w = 6.2$  [Тихонов, 2009]), в том числе сделанных не ретроспективно, а в режиме реального времени.

Три разрушительных землетрясения на о. Сахалин (Нефтегорское 1995 г. с магнитудой  $M_w = 7.2$  на северо-востоке острова, Углегорское 2000 г. с  $M_w = 7.0$  в центральной его части и Невельское 2007 г. с  $M_w = 6.2$  на юге) указали на высокий уровень сейсмической опасности этого региона. Согласно картам ОСР-2015, для северного Сахалина и западной части среднего Сахалина исходная интенсивность сотрясений принята равной 9 баллам по 12-балльной шкале MSK-64 при среднем периоде повторения 500 лет и 9–10 баллам при 1000 лет, а для восточной части среднего Сахалина и юга Сахалина – на один балл ниже. Этими обстоятельствами было инициировано развитие сети сейсмостанций на Сахалине и организация полноценной сейсмологической службы в начале 2000-х годов. С 2011 г. данные в сети СФ ФИЦ ЕГС РАН передаются в центр в автоматическом режиме, а каталоги получили высокую представительность за счет высо-

кой плотности сети (особенно на юге острова). Это благоприятствовало исследованиям сейсмического режима, включая разработку новых подходов к прогнозам ЗЛТ и адаптацию имеющихся к местным условиям.

Исключительная сложность задачи прогноза предполагает определенную этапность ее решения. В процессе реализации отдельных этапов прогноза – долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного – должно происходить постепенное уточнение оценок, приводящее к снижению неопределенности предсказания силы и времени землетрясения.

Представленная работа является продолжением исследований, проведенных в ИМГиГ ДВО РАН Иваном Николаевичем Тихоновым, который впервые применил поэтапный подход прогноза для о. Сахалин. Последние результаты в этих работах были получены десять лет назад и, понятно, еще не могли опираться на детальные инструментальные наблюдения локальной сейсмической сети (в основном использовался каталог NEIC). Тем не менее ретроспективно для района северного Сахалина с помощью алгоритма M8 была показана [Тихонов, Левин, 2015] возможность прогноза одной из самых трагичных катастроф России – Нефтегорского ЗЛТ 1995 г. ( $M_w = 7.2$ ). Сейсмологами ИМГиГ ДВО РАН в декабре 2005 г. был подготовлен долгосрочный прогноз сильного ЗЛТ с  $M_w = 6.6$  на юго-западном шельфе о. Сахалин. Основой прогноза послужили предвестники – сейсмические бреши первого и второго рода, которые были надежно картированы на юго-западном шельфе острова вблизи городов Невельск, Холмск по историческим данным о сильных землетрясениях и детальным данным сети цифровых сейсмостанций на юге о. Сахалин. Прогноз был утвержден в августе 2006 г. Российским экспертным советом по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска. Началом его реализации явилось Горнозаводское ЗЛТ 17.08.2006 г. с магнитудой  $M_w = 5.6$ . Через 6 дней после его возникновения И.Н. Тихоновым и Ч.У. Кимом был подготовлен среднесрочный прогноз более сильного события в районе тревоги. Примерно через год долгосрочный и среднесрочный

прогнозы полностью реализовались Невельским ЗЛТ 02.08. 2007 г. с магнитудой  $M_w = 6.2$  [Тихонов, 2006; Тихонов, Ким, 2008].

Следуя логике стадийности сейсмического процесса, в дополнение к среднесрочным (или, скорее, долгосрочным) методам оценки опасности Тихонов применил метод СРП (саморазвивающихся процессов) [Малышев, 1991; Малышев, Малышева, 2018]. А.И. Малышевым [Малышев, 1991] показано, что определению саморазвития соответствует хорошо известная эмпирическая зависимость Омори для числа афтершоковых толчков, а в дальнейшем эта и ряд подобных ей эмпирических закономерностей развития форшокового и афтершокового процессов были обобщены в виде нелинейного дифференциального уравнения второго порядка [Малышев, Тихонов, 2007]. Под саморазвивающимися процессами подразумевались [Малышев, 1991] такие процессы, при протекании которых изменение состояния соответствующих систем определяется текущим их состоянием. В нашей работе мы будем рассматривать только СРП, которые могут иметь отношение к форшоковым активизациям сейсмичности перед сильными землетрясениями.

Было проведено исследование сейсмичности по методу СРП для юга о. Сахалин на детальном каталоге мелкофокусных землетрясений с  $M > 2.6$  за 12-летний (2003–2014 гг.) период наблюдений [Тихонов и др., 2017]. За данный период было проанализировано 8 землетрясений с  $M = 4.6–6.2$ . И.Н. Тихонов с соавторами отмечали, что результаты могли бы быть лучше при наличии длительного (с  $M > 2.0$ ) каталога ЗЛТ по югу о. Сахалин. Несмотря на ретроспективные оценки ожидаемого события с точностью до минут, были проблемы соответствия прогнозных оценок реальным событиям. Одна из них – «залипание» прогнозной оценки времени сильнейшего толчка к концу обрабатываемой активизации в случае ее резкого ступенчатого нарастания. Это может происходить в течение 10 и более дней, а метод все это время будет давать прогноз, что ожидаемое землетрясение произойдет завтра. При этом «ступенька» может завершиться и без тако-

го землетрясения. Другая проблема состоит в выборе расчетной области для оперативного прогнозирования. Размер очаговой области для землетрясений с магнитудой 5–6 примерно 50 км. В работе [Тихонов, Ким, 2008] авторы выбрали расчетную область с радиусом в 160 км, это фактически весь юг Сахалина. Кроме того, с позиций сеймотектонической модели Сахалина такие размеры на юге острова перекрывают сразу несколько сейсмогенерирующих областей [Левин и др., 2012]. Ну а главным и очевидным минусом для полученных результатов [Тихонов, Ким, 2008] является необходимость в «настройке» алгоритма, или, точнее, его параметров, для реализации моделей СРП, причем универсальностью они не отличаются.

Нашей задачей будет определение минимально возможных размеров расчетной зоны с учетом приведенных выше ограничений и при сохранении необходимого для расчета количества сейсмических событий (например, при проведении декластеризации). Наилучшим объектом для проверки метода может быть землетрясение в Невельске в августе 2007 г. ( $M_w = 6.2$ ), так как в южной части острова сейсмическая сеть наиболее развита, а кроме того, один из главных результатов авторов [Тихонов, Ким, 2008, Tikhonov, Rodkin, 2012] был получен на о. Сахалин именно для этого события.

### Методика и результаты

В статье применен метод СРП, разработанный А.И. Малышевым (ИГГ УрО РАН) [Малышев, 1991]. Этот метод в результате многолетней работы апробирован на данных наблюдений в различных сейсмоактивных регионах [Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012]. 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 СРП 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 программный комплекс SeisDynamicsView. В работе [Tikhonov, Rodkin, 2012] метод применялся для предсказания Невельского землетрясения 02.08.2007 г.

Одним из настроечных параметров алгоритма является радиус  $R$ , определяющий сейсмоактивный объем для выборки землетрясений. Оптимальное значение радиуса должно обеспечить достаточное количество землетрясений в выборке и высокую точность оценок времени возникновения прогнозируемого события. Для малых выборок (число слабых толчков  $<15$ ) результаты оценки этого параметра могут оказаться нестабильными. В результате предварительных расчетов в работах И.Н. Тихонова с коллегами [Тихонов, 2006; Тихонов, Ким, 2008; Tikhonov, Rodkin, 2012] установлено, что оптимальное значение радиуса  $R$  для Сахалина находится в диапазоне 150–180 км. Круговая область с таким радиусом покрывает практически весь изучаемый район юга Сахалина. Расчетная выборка в данном случае состояла из 41 ЗЛТ, однако перекрывала несколько совершенно разных геологических структур, составляющих сейсмоактивные зоны, например Западно-Сахалинский и Центрально-Сахалинский разломы. Это свидетельствует о необходимости уменьшения размера расчетной области, тем более что в работе [Малышев, 2019] на примере Камчатки отмечено, что прогнозируемость форшоковой активности начинает проявляться со средних радиусов (до 30 км), а на больших (до 180 км) достигает оптимальных значений. По словам авторов работы [Тихонов, Ким, 2008], каталог был предварительно декластеризован.

В данной работе для выделения афтершоковых последовательностей сейсмических событий в каталоге землетрясений используем программу, разработанную В.Б. Смирновым в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова [Смирнов, 1997]. В алгоритм программы заложен метод локального отношения интенсивностей (ЛОИ), авторами

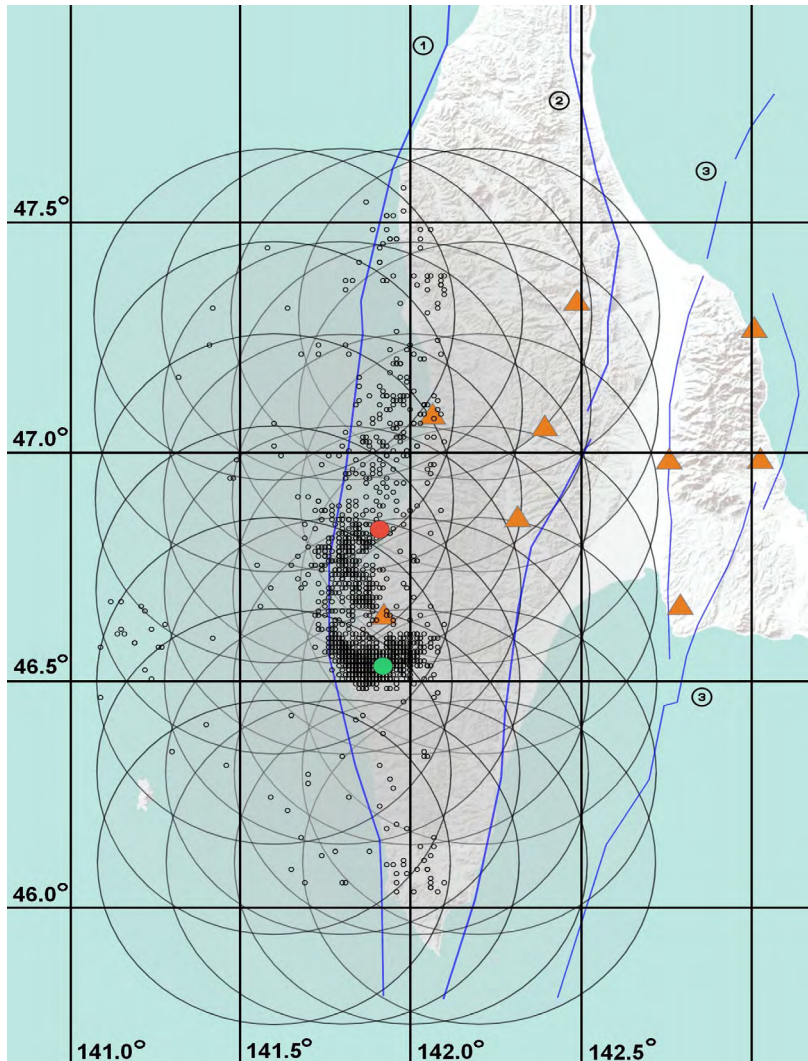
которого являются Г.М. Молчан и О.Е. Дмитриева [Молчан, Дмитриева, 1993].

Параметры расчета в методе СРП будут определены нами в начале работы и сохраняются неизменными до интерпретации результатов расчета. Выбор начальных условий должен опираться на следующие соображения:

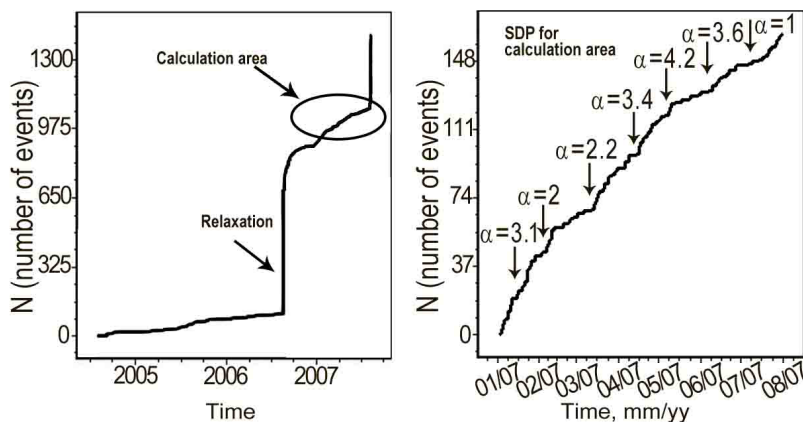
- каталог готовим только для анализа зоны Западно-Сахалинского разлома (ЗСР) с отсечением по долготе в  $142.2^\circ$ ;
- анализ проводим, так же как и в работе [Тихонов, Ким, 2008], на основе обработки каталога слабых сейсмических событий (с магнитудой не более 3.0). Дополнительно выполняем расчет и для полного каталога без ограничений по магнитуде;
- исследуемую территорию делим на 28 областей по 40 км радиусом (приемлемый размер для очаговых областей землетрясений с  $M > 6$ ), которые попарно пересекаются с площадью перекрытия 65 % (рис. 1);
- для всех областей точкой для начала анализа считаем январь 2007 г. – к этому моменту заметно снижается процесс афтершоковой релаксации в очаге Горнозаводского землетрясения августа 2006 г.

Для каждой области по мере накопления (ретроспективно, начиная с января 2007 г.) данных проводятся расчеты в программе SeisDynamicsView и при наличии решения СРП фиксируются его параметры: длительность СРП и время до реализации прогноза после фиксации решения. Данные заносятся в таблицу только для последнего СРП. На рис. 2. показан пример для зоны с координатами  $46.7\text{ N}$ ,  $142.0\text{ E}$ . Решения для четырех зон на широте  $46.7\text{ N}$  в качестве примера представлены на рис. 3. Результаты расчетов для всех зон и для двух каталогов (ЗЛТ с магнитудами  $M \leq 3$  и полного каталога ЗЛТ) сведены в табл. 1. Основными показателями выбраны: длительность СРП ( $t_4$ ), время до главного толчка после получения решения ( $t_5$ ), количество независимых решений для всей расчетной области.

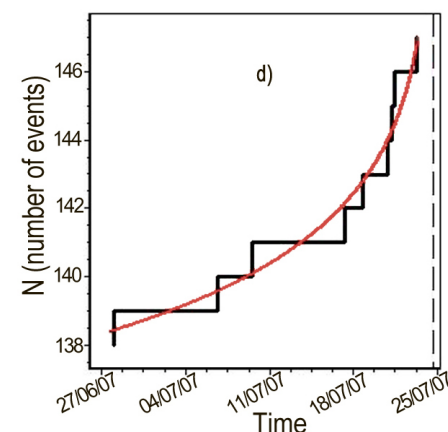
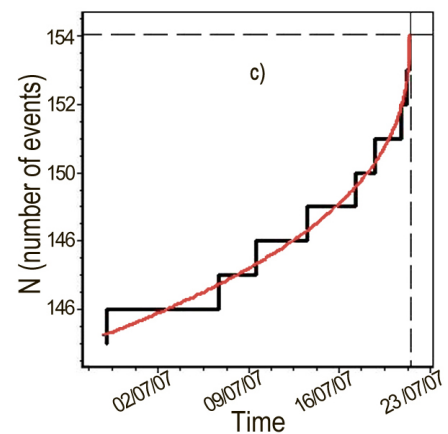
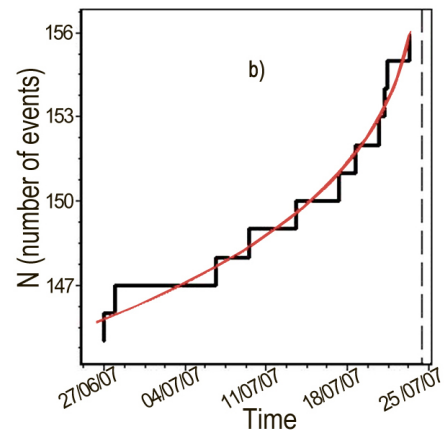
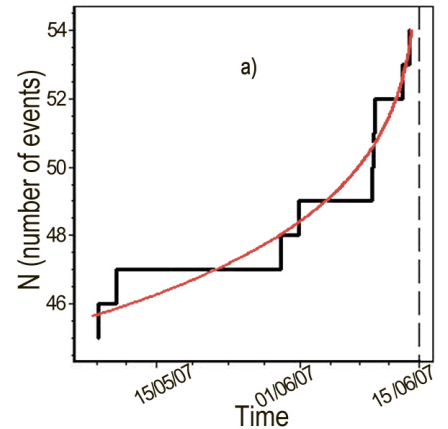
В зонах, включающих в себя эпицентральную область будущего (Невельского) землетрясения или предыдущего Горнозаводского, наблюдаются многочисленные



**Рис. 1.** Карта распределения сейсмических событий в зоне ЗСР с 2004 г. по 08.02.2007 с указанием расчетных областей для метода СРП. Красный круг – эпицентр Невельского ЗЛТ, зеленый – эпицентр Горнозаводского ЗЛТ. Треугольники – сеть автономных полевых станций юга о. Сахалин по состоянию на 2007 г. Разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Сусунайский [Харахинов, 2010].



**Рис. 2.** Слева – активность в зоне 46.7 N, 142.0 E ( $R = 40$  км) с указанием области афтершоковой релаксации после Горнозаводского землетрясения 2006 г., а также расчетной области для моделирования СРП (с января по июль 2007 г.). Справа – масштабирование расчетной области (стрелками показаны все имеющиеся решения СРП).



**Рис. 3.** Решения для зон с координатами: а) 46.7 N, 141.6 E; б) 46.7 N, 141.8 E; в) 46.7 N, 142.0 E; д) 46.7 N, 142.2 E.

Таблица 1. Результаты расчета СРП для землетрясений, предшествующих землетрясению в Невельске 02.08.2007 ( $t_1$ ) с  $M_w = 6.2$

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

Примечание. Верхняя строка – результаты расчетов для каталога ЗЛТ с магнитудами  $M \leq 3$ , нижняя – для полного каталога ЗЛТ.

(до 8) активизации, определенные в расчете как СРП. Средняя длительность последних перед главным толчком СРП в этих зонах составляет примерно месяц, хотя в краевых зонах (удаленных от эпицентральной области) достигает 100 дней (характерно для зон с низкой активностью).

Характерным параметром СРП, наравне с горизонтальными и вертикальными асимптотами, является показатель  $\alpha$ , определяющий вид кривой – парабола (при  $\alpha < 1$ ), экспонента ( $\alpha = 1$ ), гипербола ( $1 < \alpha < 2$ ), логарифмическая зависимость ( $\alpha = 2$ ), супергипербола (при  $\alpha > 2$ ). Параметр  $\alpha$  для всех решений для обоих каталогов приведен в табл. 2.

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

Использование полного каталога событий (без ограничений) для некоторых зон увеличило количество СРП (ложные тревоги в задаче поиска форшоковой активности), а в распределении параметра  $\alpha$  существенных изменений не произошло (табл. 2), что приводит к заключению о приоритетности использования в работе выборки слабых сейсмических событий.

На картах рассматриваемого региона (рис. 4) показаны землетрясения, произошедшие в те периоды времени, для которых появлялись решения по СРП. Для выделения сейсмических событий использовался каталог с января по июль 2007 г., т.е. со времени окончания релаксационного процесса после Горнозаводского ЗЛТ 17.08.2006 г. ( $M = 5.6$ ).

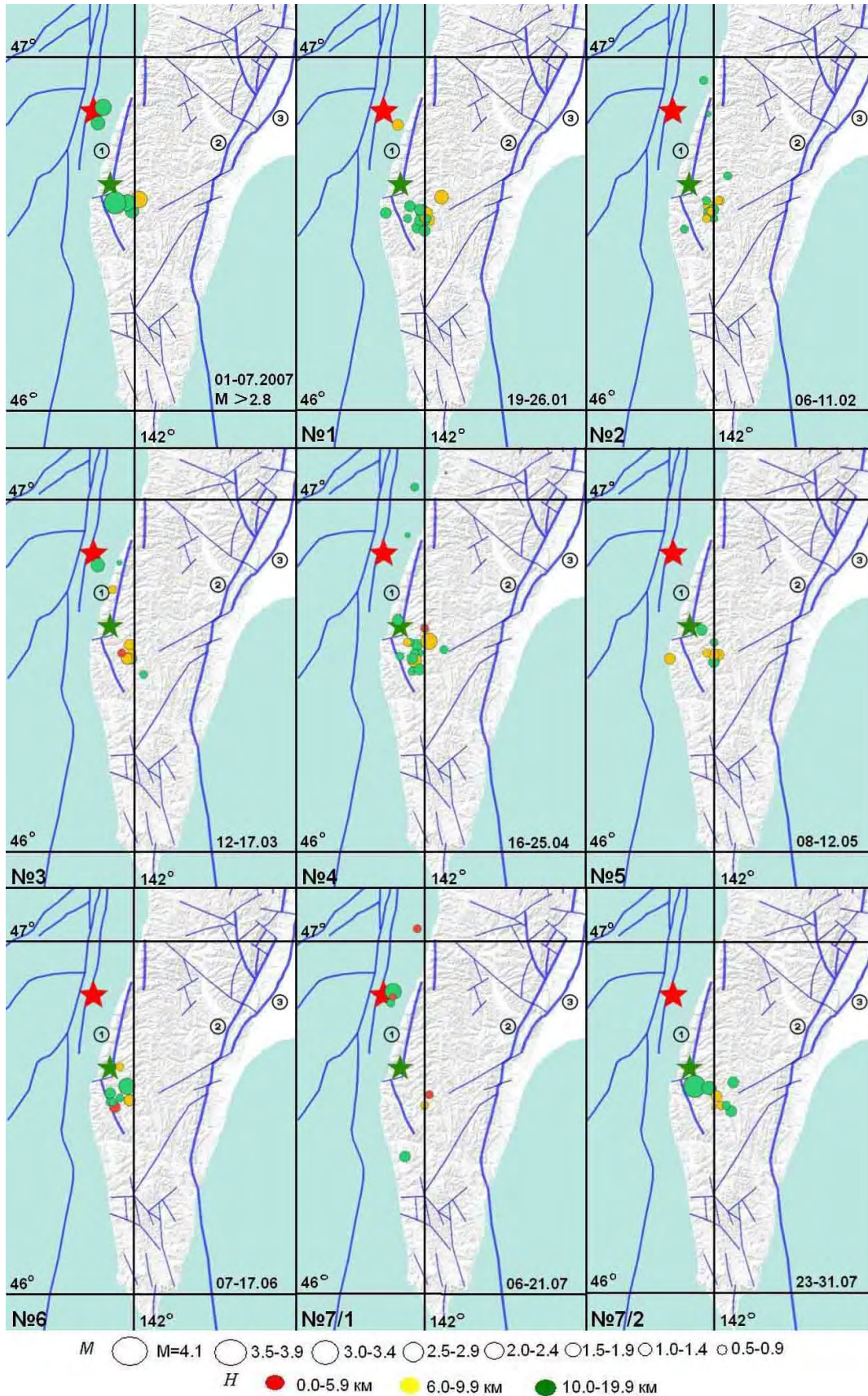
Выборка событий соответствует области с наибольшим количеством установленных саморазвивающихся процессов, т.е. области с центром в точке с координатами 46.7 N, 142.0 E и  $R = 40$  км. На приведенных картах видно, что все шесть (№ 1 – № 6) активизаций в период с января по июнь 2007 г. в основном представлены землетрясениями в эпицентральной зоне Горнозаводского ЗЛТ, что может характеризовать его афтершоковую активность. Однако параллельно с ней непосредственно в районе Западно-Сахалинского разлома в северо-западном направлении от эпицентра Горнозаводского ЗЛТ также развивается некоторая активность. Эта область представлена в основном небольшим количеством событий, однако примечательно, что в других областях в пределах данной 40-км выборки землетрясений не наблюдается вовсе. Отмечается и некоторая связь между этими двумя зонами активизации (в пределах СРП). Так, для СРП № 3, который реализовался с 12 по 17 марта, первые три события с  $M \leq 2.0$  произошли с 12 по 13 марта в первой области, событие 14 марта с  $M = 2.8$  произошло в эпицентре будущего Невельского землетрясения во второй области, а затем эти две зоны активизировались попеременно. Такие же примеры можно увидеть и для других СРП. Особняком стоят СРП № 5 и № 6, которые реализованы без проявлений активности второй области. Такое затишье будущего очага совпадает с появлением аномалии LURR (в мае 2007 г.) [Закупин, 2016; Закупин и др., 2018]. Метод LURR опирается на анализ каталога сейсмических событий и выделение периода, когда сейсмичность в терминологии теории развития сейсмического очага переходит от случайного накопления повреждений (диффуз-

Таблица 2. Значения  $\alpha$  для полученных решений СРП

Координаты расчетных зон	Кол-во СРП	Параметр $\alpha$								
46.1N 141.6E	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
46.1N 141.8E	1	2,0	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	2,8	–	–	–	–	–	–	–	–
46.1N 142.0E	1	2,5	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	3,0	–	–	–	–	–	–	–	–
46.1N 142.2E	1	2,7	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	3,1	–	–	–	–	–	–	–	–
46.3N 141.6E	2	3,3	2,7	–	–	–	–	–	–	–
	3	3,2	3,9	2,4	–	–	–	–	–	–
46.3N 141.8E	7	3,0	2,5	5,0	2,4	3,1	2,9	3,0	–	–
	6	2,3	2,9	2,7	3,7	3,6	3,7	–	–	–
46.3N 142.0E	6	2,4	2,6	2,3	4,5	3,7	3,0	–	–	–
	7	3,0	5,0	2,0	2,9	4,3	4,5	4,1	–	–
46.3N 142.2E	6	1,8	2,3	2,3	2,6	3,7	3,3	–	–	–
	8	2,3	2,2	2,3	2,9	4,5	5,8	5,7	4,1	–
46.5N 141.6E	2	2,9	2,1	–	–	–	–	–	–	–
	2	5,9	2,1	–	–	–	–	–	–	–
46.5N 141.8E	6	2,2	2,8	2,5	3,0	3,0	2,9	–	–	–
	6	3,0	3,3	4,1	2,2	4,0	2,6	–	–	–
46.5N 142.0E	7	1,9	2,8	2,7	2,7	3,3	2,9	2,1	–	–
	7	2,2	2,6	3,5	4,1	3,1	3,8	2,4	–	–
46.5N142.2E	6	2,4	2,7	2,0	5,8	3,2	2,8	–	–	–
	7	2,6	3,3	5,1	4,2	3,2	3,1	3,2	–	–
46.7N 141.6E	2	3,1	2,2	–	–	–	–	–	–	–
	3	2,5	2,6	2,2	–	–	–	–	–	–
46.7N 141.8E	7	3,1	2,0	2,1	2,1	3,4	4,2	2,8	–	–
	8	3,1	2,9	2,1	4,1	4,4	2,9	3,2	2,4	–
46.7N 142.0E	7	3,1	2,0	2,2	3,4	4,2	3,6	<b>1,0</b>	–	–
	7	3,4	2,9	4,4	4,1	3,4	3,1	2,7	–	–
46.7N 142.2E	7	3,1	2,8	4,4	2,6	4,7	3,6	2,8	–	–
	6	3,1	3,2	4,1	3,1	3,6	2,0	–	–	–
46.9N 141.6E	2	3,5	3,8	–	–	–	–	–	–	–
	2	4,9	3,8	–	–	–	–	–	–	–
46.9N 141.8E	2	2,7	2,7	–	–	–	–	–	–	–
	3	4,2	3,3	4,8	–	–	–	–	–	–
46.9N 142.0E	4	3,0	3,2	3,2	3,4	–	–	–	–	–
	4	2,7	3,4	2,9	4,6	–	–	–	–	–
46.9N 142.2E	3	3,2	3,0	3,7	–	–	–	–	–	–
	2	3,5	2,5	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 141.6E	1	4,2	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	3,2	–	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 141.8E	3	2,1	2,8	3,5	–	–	–	–	–	–
	2	2,1	2,9	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 142.0E	2	2,2	3,5	–	–	–	–	–	–	–
	2	2,2	4,0	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 142.2E	2	2,9	3,2	–	–	–	–	–	–	–
	2	2,9	3,4	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 141.6E	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 141.8E	1	4,4	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	1,8	3,6	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 142.0E	1	8,9	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	2,0	8,9	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 142.2E	1	6,6	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	1,8	6,6	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. Верхняя строка – значения параметра  $\alpha$  для каталога ЗЛТ с магнитудами  $M \leq 3$ , нижняя – для полного каталога ЗЛТ.





**Рис. 4.** Эпицентры землетрясений, произошедших в периоды активизаций (СРП). Красная звездочка – эпицентр Невельского землетрясения, зеленая – Горнозаводского. Синие линии – разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Сусунайский [Харахинов, 2010].

ного) к детерминированному накоплению. Определенность состоит в том, что на этой стадии подготовлен ряд областей с высоким уровнем напряжений, в которых готовы развиваться объединения дефектов более высокого ранга (укрупнение), а они в дальнейшем сформируют магистральный разрыв (сильное землетрясение). Именно поэтому данный метод опирается на анализ землетрясений среднего уровня (по Сахалинскому каталогу диапазон определен с магнитудами от 3.3 до 5). Переход очага в такую стадию означает рост параметра LURR, который рассчитывается как отношение отклика среды на нагрузку к разгрузке. Компонента приливных напряжений в тензоре для площадки, где расположен слип-вектор, для каждого ЗЛТ является индикатором нагрузки/разгрузки. Градиент этой компоненты (нагрузка или разгрузка) определяется моментом достижения максимальных значений фактора Кулона.

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

Полученные результаты указывают на ограниченность явных признаков, по которым можно выделить последний СРП. Параметр  $\alpha$  для последнего СРП был близок к единице и значительно отличался от остальных, а поскольку отмечено, что активизации наиболее близки зависимости

гиперболического типа (от 1 до 1.5) [Малышев, 2019], то результат достаточно неожиданный. Интересен и тот факт, что затишье очаговой области, в которой впоследствии возникает землетрясение, по времени совпадает с аномалией LURR (май 2007 г.), а предвестником «правильного» СРП могут быть умеренные события в будущем очаге, которые происходят в процессе активизации или в рядом расположенных активных зонах. Это показывает возможность использовать метод СРП как инструмент анализа постпредвестникового периода LURR.

Учитывая высокую вовлеченность в представленные саморазвивающиеся процессы событий в области очага Горнозаводского ЗЛТ (рис. 4), проведем декластеризацию землетрясений каталога методом, изложенным в [Смирнов, 1997]. Начальный каталог, состоявший из 242 событий (с января по конец июля 2007 г.), соответствующий зоне, показанной на рис. 1, после декластеризации сократился до 114 событий. Сильнее процесс отбраковки сказался на выделенной нами для расчета области (координаты 46.7 N, 142.0 E и  $R = 40$  км.), где получено максимальное количество СРП. В ней из 163 событий осталось 36.

На рис. 5 отчетливо выделяются 2 процесса, они продолжительны (несколько месяцев), а последний из них впервые отмечается ретроспективно 20 июля 2007 г., после чего события 20–29 июля дополнительно генерируют сильный скачок активности (рис. 5) и происходит «залипание» прогнозной оценки по времени.

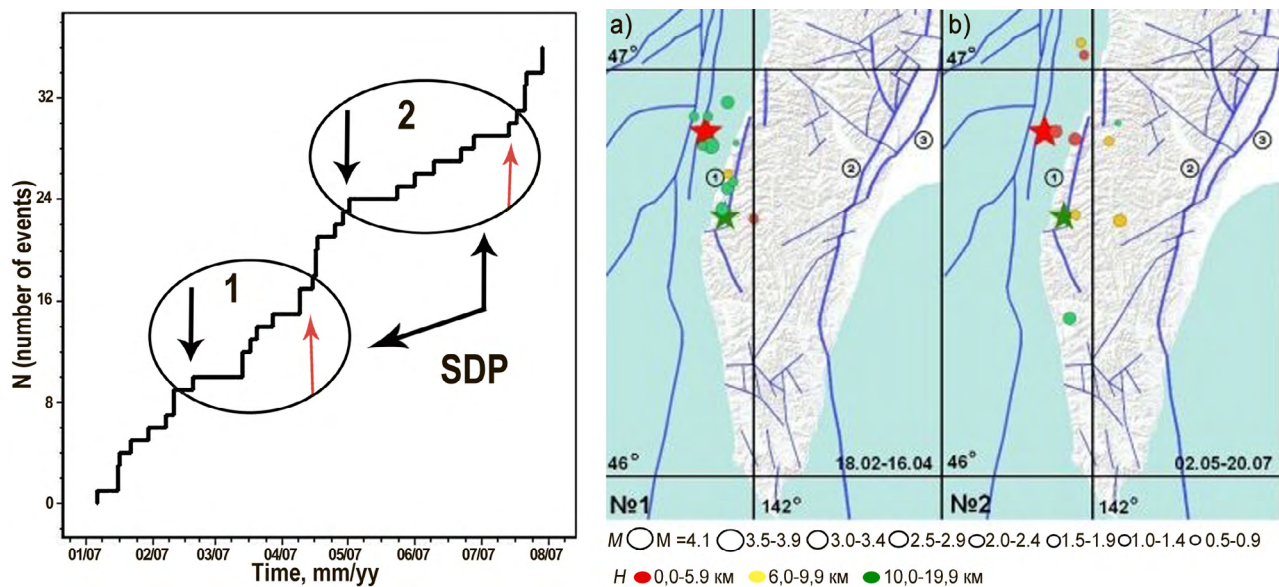
Итак, ложным предвестником оказался первый из двух процессов (после него не было землетрясения), и это хорошо – ведь до отбраковки афтершоков таковых (ложных предвестников СРП) было шесть. В приведенном случае возникает тривиальный вопрос – есть ли различие между первой активизацией (ложным предвестником) и второй, сразу после которой и произошло Невельское землетрясение. И если да, то как эти различия можно применять для отсека ложных тревог в реальном прогнозе. Расчет показал, что параметр  $\alpha$  в первом случае равен 3.19, а во втором 3.71. Это согласуется с

работой [Tikhonov, Rodkin, 2012], где были такие же значения, и здесь различий для нас не наблюдается. Первый СРП закончился в конце апреля 2007 г., а второй начался в мае 2007 г., и это совпадает с появлением предвестника по методу LURR. В первой части работы (использовали полный каталог событий) для отсеки ложных СРП был предложен предвестник LURR, в результате чего из семи активизаций остались только две. В данном случае (с проведением декластеризации) у нас два СРП на весь рассматриваемый период, а после предвестника LURR всего один. Мы пришли к выводу, что для данного примера (Невельского ЗЛТ) декластеризация существенно улучшает результат. Она минимизирует неопределенность при анализе саморазвивающихся процессов, этот результат совпадает с результатом [Tikhonov, Rodkin, 2012]. Однако мы также хорошо понимаем и другую сторону данного вопроса – этот случай был весьма удобен для отработки алгоритма декластеризации, так как времени от основного толчка (Горнозаводское ЗЛТ) прошло немного и больших ошибок алгоритм не допустил. Если же, например, последнее сильное ЗЛТ произошло в области через 5 и более лет после основного ЗЛТ, различные алгоритмы декластеризации могут давать поразительно различные

результаты, и тем самым будут усугубляться ошибки в оценках СРП. В таких неоднозначных случаях очистку каталога от афтершоков лучше не проводить и ограничиться данными по вариациям LURR в рассматриваемой области. Параметр LURR, эффективность которого для Сахалина может считаться убедительной [Закупин и др., 2018], рекомендуется использовать как временной порог для выявления активизаций СРП, могущих стать форшоковыми (предвестниками сильного землетрясения).

### Заключение

В работе предложен подход для объективной оценки результатов моделирования методом саморазвивающихся процессов, а также набор условий для проведения независимых от субъективных оценок расчетов. И хотя в данной работе прогнозы в реальном времени не представлены, очевидно, что, при некотором снижении точности прогноза и появлении дополнительных ложных тревог, предложенный подход потенциально можно использовать не только ретроспективно. Результаты получены для Невельского землетрясения 2007 г. на о. Сахалин. Показано, что за три месяца до землетрясения в Невельске в краевых зонах (удаленных от эпицентра) были зафиксированы сейсмические последователь-



**Рис. 5.** Слева - активность в зоне 46.7 N, 142.0 E ( $R = 40$  км) с указанием (цифрами) решений СРП (self-organized process, SDP), а также начала (черная стрелка) и конца (красная стрелка) расчетной выборки для каждого случая. Справа – эпицентры землетрясений, произошедших в периоды активизаций под номерами 1 (а) и 2 (б). Остальные усл. обозначения см. на рис. 4.

ности, определенные как СРП, при этом они были там единственные, но очень продолжительные (по причине низкой активности и, соответственно, более длительного периода для охвата исследуемых событий в выборке). Такая же продолжительность достигается и в зонах, близких к эпицентру, после удаления афтершоков из каталога (декластеризации). До проведения декластеризации сделано заключение о значительном влиянии на расчеты процесса релаксации в очаге Горнозаводского ЗЛТ, поэтому в зонах, близких к будущему эпицентру, количество активизаций на периоде в 8 мес. достигает восьми. При этом по времени они очень короткие, а время ожидания перед последним СРП всего несколько дней.

Анализ параметров, определяющих характер саморазвивающегося процесса (для недекластеризованного каталога), показал, что в единственном случае вид аппроксимирующей кривой близок к экспоненциальному типу (нехарактерному для СРП), и этот случай относится к последней активизации в эпицентральной области (параметр  $\alpha$  меньше 2). При проведении декластеризации появляются более продолжительные последовательности, для которых получено решение. Они представлены небольшим количеством событий, а значение  $\alpha$  превышает 3 и согласуется с данными работ И.Н. Тихонова.

Распределение сейсмических событий в период развития выявленных последовательностей свидетельствует о формировании очага Невельского землетрясения уже с января 2007 г. Отмечено, что ближе к моменту главного толчка в очаге появляются события большей магнитуды, а с появлением признака LURR наблюдается период сейсмического затишья.

Показано, что в плане количества активизаций расчеты для полного каталога событий и каталога слабой сейсмичности (магнитудами  $M \leq 3$ ) практически идентичны. В то же время распределение параметра  $\alpha$ , определяющего характер кривой, значительно различается для этих двух выборок. При рассмотрении различий в значениях  $\alpha$  однозначных выводов сделать нельзя (разве что для полного каталога вообще нет экспоненциального типа), однако из соображений

снижения общего количества активизаций предпочтительней использовать каталог для слабых событий.

Независимо от существования предвестника по методу LURR, значительно сокращает количество СРП (с 7 до 2) предварительная декластеризация каталога сейсмических событий, что проверено на эпицентральной зоне Невельского землетрясения. Это говорит о целесообразности данной процедуры для зон, где сравнительно недавно (в данном случае в пределах одного года) происходили сильные ЗЛТ, формирующие длительные афтершоковые последовательности.

#### 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 // *Геоинформатика*. 2016. № 1. С. 34–43.
3. 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. Т. 59, № 11. С. 1904–1911. doi: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 ( $M_w = 5.8$ ) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*. 59(11): 1526–1532. doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012]
4. Зубков С.И. *Предвестники землетрясений*. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 140 с.
5. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин = Levin B.V., Chun Un Kim, Solovjev V.N. Seismic hazard estimate and results of detailed seismic zoning for the cities of Sakhalin Island // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 5. С. 93–103.
6. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // *Вулканология и сейсмология*. 1991. № 4. С. 61–72.
7. Малышев А.И. Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2019. № 1. С. 52–66. [Malyshev A.I. The predictability of seismicity and large earthquakes: Kamchatka 1962 to 2014. *J. of Volcanology and Seismology*. 2019, 13(1): 42–55]. doi.org/10.31857/s0205-96142019152-66
8. Малышев А.И., Малышева Л.К. Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога

- USGS = Malyshev A.I., Malysheva L.K. Predictability of seismic energy rate in northwest frame of Pacific Ocean on the base of USGS catalogue // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 3. С. 141–153. doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153
9. Малышев А.И., Тихонов И.Н. Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени // *Физика Земли*. 2007. № 6. С. 37–51.
10. Матвиенко Ю.Д. Применение методики М8 на Камчатке: успешный заблаговременный прогноз землетрясения 5 декабря 1997 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 6. С. 27–36.
11. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Целевой подход к проблеме идентификации афтершоков // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. М.: ОИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 62–69.
12. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // *Тихоокеанская геология*. 1999. № 6. С. 59–70.
13. Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 4. С. 93–105.
14. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 4–5. С. 63–72.
15. Тихонов И.Н. Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 214 с.
16. Тихонов И.Н. Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе острова Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 года // *Тихоокеанская геология*. 2009. Т. 28, № 5. С. 22–29.
17. Тихонов И.Н., Ким Ч.У. Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. (MLH = 6.2) на юге о-ва Сахалин // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 420, № 4. С. 532–536.
18. Тихонов И.Н., Левин Б.В. Прогноз сильных землетрясений Сахалинской области: история, результаты и перспективы // *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всерос. науч. конф. с международным участием, 26–31 мая 2015, Южно-Сахалинск*. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 41–45.
19. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения // *Тихоокеанская 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. doi.org/10.1134/s1819714017010092]
20. Харахинов В.В. *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Научный мир, 2010. 275 с.
21. Arellano-Baeza A.A., Zverev A.T., Malinnikov V.A. Study of changes in the leniament structure? Caused by earthquakes in South America by applying the leniament analysis to the Aster (Terra) satellite data // *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37. P. 690–697. doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.068
22. Geller R.J. Earthquake prediction: A critical review // *Geophysical J. International*. 1997. Vol. 131(3). P. 425–450. doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x
23. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. Earthquakes cannot be predicted // *Science*. 1997. Vol. 275(5306). P. 1616–1619. doi.org/10.1126/science.275.5306.1616
24. Hamilton R.M. The President's Page: Earthquake prediction and public reaction [Guest Editorial] // *EOS, Transactions American Geophysical Union*. 1974. Vol. 55(8). P. 739–742. doi.org/10.1029/eo055i008p00739
25. Kagan Y. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: Regional comparison // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102(B2). P. 2835–2852. doi.org/10.1029/96jb03386
26. Swinbanks D. Trying to shake Japan's faith in forecasts // *Nature*. 1992. Vol. 356. P. 464–465. https://doi.org/10.1038/356464a0
27. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. Confirmed prediction of the 2 August 2007 Mw 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia) // *Tectonophysics*. 2010. Vol. 485 (1–4). P. 85–93. doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002
28. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. Earthquake research and analysis // Sebastiano D'Amico, Dr (ed.). *Statistical Studies, Observations and Planning*. Malta: Univ. of Malta, 2012. P. 43–78.
29. Wyss M. Cannot earthquakes be predicted? // *Science*. 1997. Vol. 278(5337). P. 487–488. doi.org/10.1126/science.278.5337.487
30. Wang K., Chen Qi-Fu, Sun Shihong, Wang Andong. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. Vol. 96(3). P. 757–795. https://doi.org/10.1785/0120050191
31. Zhang G., Fu Z. Some features of medium and short-term anomalies before great earthquake // *Earthquakes Prediction: An International Review*. 1981. P. 497–509. (Maurice Ewing Series; vol. 4). https://doi.org/10.1029/me004p0497 .

Об авторах

ЗАКУПИН Александр Сергеевич (ORCID 0000-0003-0593-6417), кандидат физико-математических наук, зам. директора, БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник, АНДРЕЕВА Марина Юрьевна (ORCID 0000-0002-7851-3311), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник – лаборатория сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.