

УДК 550.343(571.642)

А.С. ЗАКУПИН, О.А. ЖЕРДЕВА

## Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для северного Сахалина

*Изучены возможности метода среднесрочного прогноза сейсмической опасности LURR (load/unload response ratio) на территории северного Сахалина. Показано, что, как и для южного Сахалина, результаты по которому были опубликованы ранее, потенциал метода достаточно высок. Получены удовлетворительные результаты по всем сильным событиям ( $M > 5,5$ ) с периодом ожидания не больше полутора лет. Ретроспективная оценка возможности использования предлагаемого подхода выполнена на основе данных детального каталога землетрясений за период с 1988 по 2005 г.*

*Ключевые слова: сейсмичность, прогноз, LURR.*

**Retrospective evaluation of applicability for medium-range prediction of earthquakes within the Northern Sakhalin region.** A.S. ZAKUPIN, O.A. ZHERDEVA (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

*We have studied possibilities of medium-range prediction of seismic danger by the LURR-method in the North Sakhalin. It is shown that, as well as for the South Sakhalin, the results by which were published before, potential of the method is high enough. For all strong earthquakes ( $M > 5.5$ ) calculations showed satisfactory results with a waiting period of no more than a year and a half. Retrospective evaluation of the possibility of using this approach is made using the detailed earthquake catalog data for the observation period from 1988 to 2005.*

*Key words: seismicity, prediction, LURR.*

### Введение

В последние два десятилетия в пределах Сахалинской области наблюдается высокая сейсмическая активность. Особенно тяжелыми были последствия двух землетрясений на о-ве Сахалин: Невельского 1995 г. ( $M_w = 7,2$ ) и Невельского 2007 г. ( $M_w = 6,2$ ). В результате первого был практически полностью разрушен г. Невельск, погибли около 2000 чел., материальный ущерб составил около 4 млрд руб. Более умеренное по силе Невельское землетрясение привело к материальному ущербу в сумме примерно 6 млрд руб. Сейсмическая обстановка диктует необходимость развития исследований по выявлению закономерностей подготовки сильных событий и использованию их в средне- и краткосрочных экспериментальных прогнозах. К настоящему времени достигнуты определенные успехи в плане долго- и среднесрочного прогнозирования сильных землетрясений. В первую очередь следует отметить прошедшие длительную апробацию методы российских сейсмологов, в частности С.А. Федотова [11–13], В.И. Кейлис-Борока и

---

\*ЗАКУПИН Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ЖЕРДЕВА Ольга Андреевна – старший инженер (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск). \*E-mail: a.zakupin@imgg.ru, o.zherdeva@imgg.ru

В.Г. Кособокова [5, 7, 15], Г.А. Соболева [9], А.Д. Завьялова [1]. Эти подходы базируются на сейсмологических данных, а прогнозы составляются, как правило, на периоды 5–10 лет (долгосрочный) и 3–5 лет (среднесрочный).

В данной работе рассмотрен подход для среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR (load/unload response ratio) [17, 18], в некотором смысле находящийся ближе к краткосрочному прогнозу, так как охватывает период от нескольких месяцев до двух лет. Название метода можно перевести с английского как «отношение отклика среды на нагрузку/разгрузку». 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 нагрузки/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 Беньоффа 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 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 по времени (временной лаг с момента определения прогнозного признака, вариации LURR). Очевидно, что эта задержка зависит от геологических условий.

Методика LURR появилась в 90-х годах прошлого столетия [17] и, по данным работ [14, 17, 18], была успешно применена для нескольких сейсмически активных районов нашей планеты. Кроме того, методика проверена в серии лабораторных экспериментов на образцах горных пород [19]. В ИМГиГ ДВО РАН эту методику используют с 2014 г. Расчеты проводятся с помощью программного комплекса Seis-ASZ, разработанного в ИМГиГ [2, 3].

Для юга Сахалинской области методом LURR нами были получены удовлетворительные результаты, в частности, по Невельскому землетрясению [2, 3, 10]. Сейсмичность северной части острова представляет не меньший интерес, а в связи с добычей углеводородов на шельфе является весьма актуальным вопросом. Первые результаты по северу Сахалина [2] мы получили на основе анализа каталога плотной сети сейсмических станций, развернутой в ИМГиГ ДВО РАН в 2006 г. [16]. Данная сеть позволяет уверенно регистрировать землетрясения (ЗТ) начиная с  $M_w = 2$ . В отличие от результатов по южной части острова, результаты по северу Сахалина показали оперативный прогноз [2]. По расчетам очаг будущего землетрясения мог располагаться в зоне 51–52° с.ш., 142–143,5° в.д.

На время написания данной статьи (июль 2016 г.) задержка составляла 17 мес. (начало периода ожидания установлено с февраля 2015 г.)\*.

Для того чтобы получить дополнительную информацию и оценить рамки применимости метода для севера Сахалина, имеет смысл произвести ретроспективные расчеты. Одним из самых сильных землетрясений в истории Сахалина, при этом имевшим место всего 20 лет назад, является Нефтегорское 1995 г. [4]. Для анализа был использован каталог региональной сети [8] за период с 1988 по 2005 г.

### Методика

Метод LURR очень подробно излагается в оригинальных работах [17, 18], поэтому ограничимся лишь вопросом выбора параметров для моделирования.

В каталоге Л.Н. Поплавской [8] с 1988 по 2005 г. значится 2577 событий с магнитудами от 3 до 7,2. Устанавливаем диапазон рабочих магнитуд от 3,3 до 5 (прогноз событий с  $M > 5,5$ ). Выбор диапазона можно объяснить с позиции любой модели разрушения, которая использует иерархию дефектов. Нарушение в среде, определяющее потерю несущей способности (сопротивление нагрузкам), иногда называют магистральным разрывом, но его образование – это финальная часть процесса. По мере диффузного накопления микротрещин (в упругой области деформирования) дефекты объединяются в структуры высшего ранга. В нелинейном аспекте эти процессы приурочены к областям, где максимальные касательные напряжения концентрируются на площадках, расположенных под углом  $45^\circ$  к оси действия главного нормального напряжения. Для Сахалина, где события, отождествляемые с макроразрывом геосреды (отличающиеся афтершоковой активностью), могут достигать магнитуд 6 и более, землетрясения  $M > 5$  – это или главные толчки, или их первые афтершоки, а диапазон от 3 до 5,5 отвечает за подготовку главного, магистрального разрыва.

В рабочую выборку вошли 1328 событий. Так как среднегодовое число землетрясений около 78, то целесообразно работать с большими окнами – возьмем 360 дней. Территория для выбора расчетных зон небольшая – всего по  $4^\circ$  с.ш. и в.д., поэтому, так же как и в [2], можно использовать пересекающиеся зоны. Расположение зон, а также землетрясения рассматриваемого периода показаны на карте (рис. 1). Отдельные зоны разного размера (№ 2, 4, 5) размещены в эпицентре Нефтегорского ЗТ (27.06.1995,  $M_w = 7,2$ ). Еще одна зона (№ 3) располагается в эпицентре Пильтунского ЗТ [6], которое произошло 12.06.2005 г. ( $M_w = 5,6$ ) в акватории Охотского моря. Информация по расчетным зонам представлена в таблице.

Координаты и размер расчетных зон

№ расчетной зоны	Координаты центра, °		Размер (полуосей эллипса)
	Северная широта	Восточная долгота	
1	53	143	2
2	52,55	142,75	2
3	52,8	144,07	1,5
4	52,55	142,75	1,5
5	52,55	142,75	1
6	51	143	2

\*Данный прогноз успешно реализовался 14 августа 2016 г. в 11:15:13 UTC А. Локальная магнитуда составила  $M_L = 6,1$ . Координаты эпицентра: 50,351 N, 142,395 E. Событие произошло на глубине 9 км, недалеко от села Онор. Относительно прогнозируемой зоны погрешность в определении эпицентра есть только по широте, она составляет  $0,7^\circ$  с.ш. Детально авторы планируют рассмотреть это событие в отдельной статье.

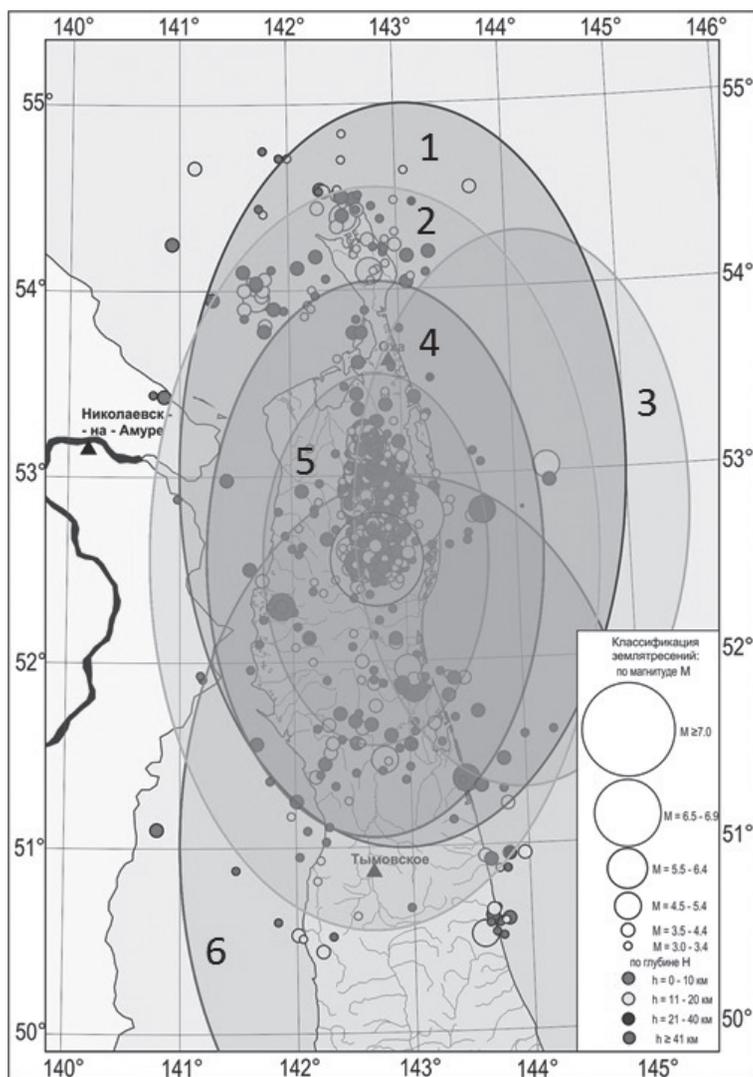


Рис. 1. Карта северной части о-ва Сахалин с эпицентрами землетрясений в период с 1988 по 2005 г. Указаны расчетные зоны № 1–6

В работе [10] отмечено, что для перехода от среднесрочного прогноза LURR к методам краткосрочного прогнозирования уточнение эпицентра и времени является важной задачей. Предложенное разбиение (с учетом невозможности уменьшения размеров зон) позволит получить максимально точные оценки.

## Результаты

Результаты обработки представлены на рис. 2. На всех графиках (кроме графика по зоне 6) можно выделить две значимые вариации LURR: первая завершается в начале 1994 г., а вторая в декабре 2004 г.

Значения других вариаций незначительно превышают 2 (они несостоятельные). Хорошие результаты отмечены в зонах с эпицентрами обоих землетрясений. Подготовка землетрясений ощущается даже в самых больших зонах (2°, рис. 2, зоны 1 и 2), однако для них характерны низкие значения вариаций LURR (усреднение по большей территории).

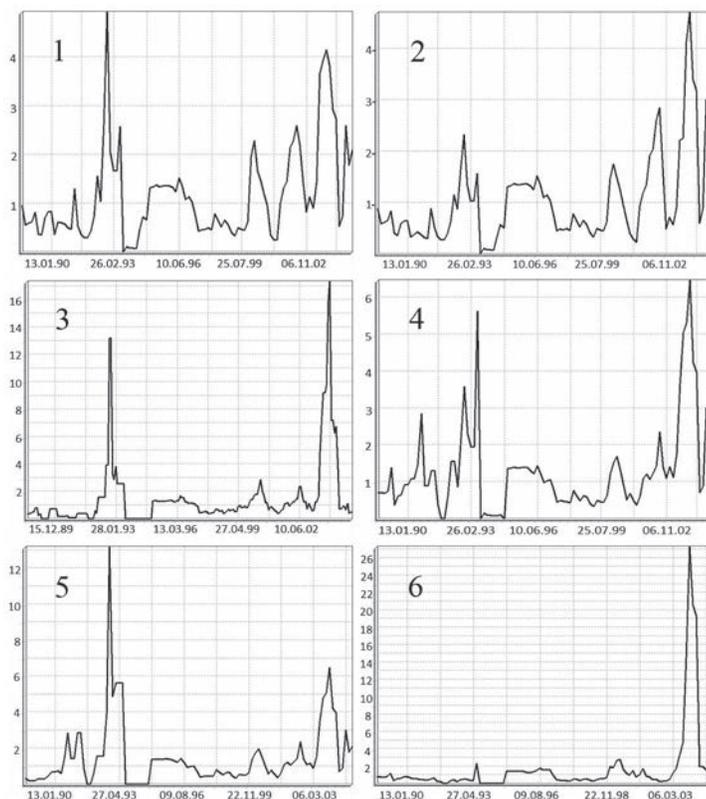


Рис. 2. Результаты расчета LURR в расчетных зонах № 1–6

Наилучшие показатели получены для области № 3. В ней расчет LURR дал два прогнозных признака (предвестники), которые четко предвещают Нефтегорское и Пильтунское ЗТ. Для Нефтегорска сужение зоны до минимально возможной ( $1^\circ$ ) значительно улучшает результат и подтверждает, что рекомендации о выборе полуосей размером не больше  $1^\circ$  вполне обоснованны [17]. По расчетной зоне № 6 сделан вывод о формировании предвестника Пильтунского землетрясения в области, расположенной ниже  $53^\circ$  с.ш. Возможно, что варианты с другим расположением зон могли бы добавить детальности, но в таком случае предпочтительно использовать автоматизированную подборку зон, которая пока в программном комплексе не предусмотрена, но может стать направлением для расширения функционала. Различий в расположении вариаций на графиках не отмечено (прогнозный период наступает после выхода на фоновый уровень, реже после начала снижения) – на всех задержка по Нефтегорскому ЗТ составила около полутора лет, а по Пильтунскому не больше 6 мес. Если сопоставить данные результаты с существующим прогнозом по северу острова [2], то задержка по нему на июль 2016 г. не превышает задержку по расчетному прогнозу Нефтегорского ЗТ.

Безупречный с точки зрения математической статистики (отсутствие ложных тревог, пропусков цели) результат использования метода LURR для Сахалина ограничен сравнительно небольшим периодом, для которого он был получен (2003–2016 гг.). Использование каталога Л.Н. Поплавской [8], который основывается на данных региональной сети сейсмических станций и берет свое начало в 1905 г., позволило закрепить полученный результат. Несмотря на то что методически удалось применить данные из каталога только с 1988 г., было показано (на примере Нефтегорского и Пильтунского землетрясений), что среднесрочный прогноз методом LURR вполне возможен. Задержки реализации от нескольких месяцев до полутора лет предоставляют геофизикам и сейсмологам хорошие

возможности. В пределах года намного проще создать и поддерживать (экономически) мобильные пункты геофизического мониторинга (уровень грунтовых вод, изотопы радона, сейсмоакустический шум, естественное электромагнитное поле и др.), которые могут выявить ряд аномалий, проявляющихся незадолго перед ЗТ (сутки, часы). Зачастую краткосрочные методы имеют много ложных тревог (так как мониторинг, как правило, проводится не в то время и не в том месте) и научной общественностью не воспринимаются. Метод LURR довольно точно показывает зону будущего очага (до 200 км), и в пределах такой зоны вполне реально найти подходящие места для наблюдений. Исходя из общих соображений, такими зонами могут быть активные разломы.

В то же время не хотелось бы завершить работу, ограничившись Сахалином; мы ощутили потребность в проверке метода и используемого программного обеспечения в других регионах планеты. Выбор был сделан произвольно, в основном по доступности каталогов и наличию сильных землетрясений.

Для исследования был использован сейсмический каталог NEIC (USGS, <http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>) по зоне, включающей территорию Непала. Распределение эпицентров в пространстве показано на рис. 3. С одной стороны, откровенно слабая сейсмичность и каталог с низкой представительностью – это большая проблема для метода LURR, но, с другой стороны, подготовка землетрясения 25.04.2015 г. ( $M_w = 7,8$ ) именно в такой зоне не могла остаться незамеченной с точки зрения используемой модели.

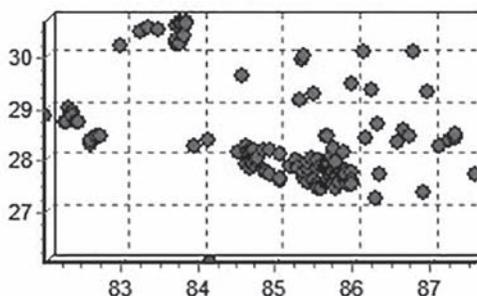


Рис. 3. Схема распределения эпицентров землетрясений в Непале с 2008 по 2015 г.

События в каталоге имеют магнитуды  $M_w > 4$ , он содержит всего 127 элементов. Несмотря на то что землетрясений в каталоге очень мало, а в диапазоне от 3,3 до 5 их вполнину меньше, результат расчета стал приятной неожиданностью (даже при сравнительно небольших окнах). До этого на данной территории не наблюдались события  $M > 6$ , а землетрясение, произошедшее в 2015 г., разрушило столицу Непала. Параметры обработки: окно 240 дней, шаг 5 дней, диапазон рабочих магнитуд от 3,3 до 5. Результат представлен на рис. 4, на котором также изображен масштабированный участок с сильнейшей вариацией параметра LURR.

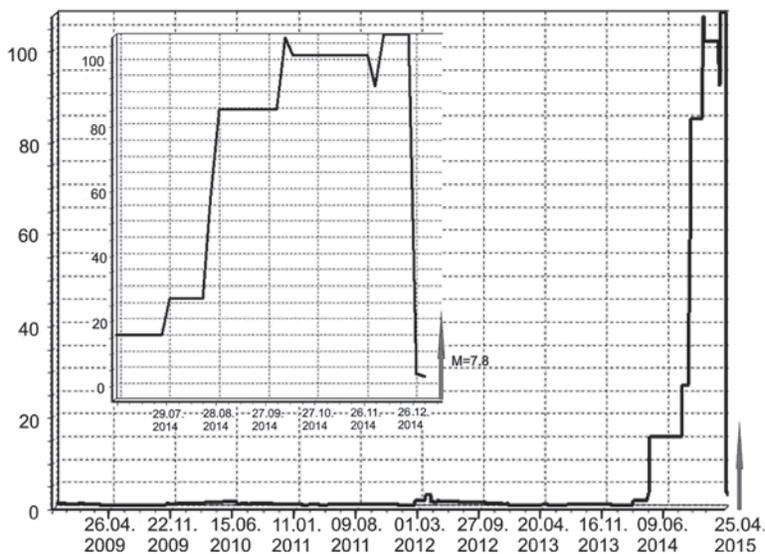


Рис. 4. Ретроспективная оценка LURR для землетрясения в Непале 25.04.2015 г. ( $28,15^\circ$  с.ш.,  $84,71^\circ$  в.д.,  $M_w = 7,8$ )

На графике видно, что с 5 по 10 августа 2014 г. значение параметра LURR возросло в 20 раз (с учетом половины окна). Попробуем ретроспективно описать потенциальный процесс реакции на ситуацию. Объявляется тревога 10 августа 2014 г., и параметр внимательно отслеживается. До 24 ноября (больше 3 мес.) изменений нет, а затем до конца декабря параметр в 2 этапа достигает 85-кратного превышения нормы. К 7 февраля это уже 105. И вот первое снижение 12 февраля, затем второе – до фоновых значений в начале апреля 2014 г. Через 25 дней произошло землетрясение с  $M_w = 7,8$ . В целом от объявления угрозы до события прошло чуть больше 7 мес. С точки зрения концепции LURR, где задержки могут достигать двух лет, и в сравнении с Сахалином этот результат можно считать показательным.

Очевидно, что в ряду различных методов прогноза сейсмической опасности LURR должен занимать достойное место, в частности в многоуровневых методиках, где в итоге реализуется краткосрочный прогноз.

### Заключение

На примере северного Сахалина и Непала ретроспективно продемонстрирована возможность прогноза сильных сейсмических событий с задержками, не превышающими полтора года. Отмечено, что для Сахалинского региона все сильные сейсмические события ( $M_w > 5,5$ ) в период с 1988 г. по настоящее время удалось ретроспективно прогнозировать. При этом ложные тревоги не зафиксированы. Локация очаговой зоны осуществляется с точностью, характерной для метода LURR (по одному градусу по полуосям эллипса).

В дальнейшем в ИМГиГ ДВО РАН целесообразно проводить анализ LURR в оперативном режиме для достижения задачи реального прогноза (технически это возможно с задержкой оперативных данных не более одного месяца). При этом при дальнейшей апробации метода необходимо и расширение географии с целью развития представлений о влиянии региональных особенностей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. 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. Seis-ASZ: свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016611230. Заявл. 05.11.2015; опублик. 20.02.2016.
4. Землетрясение в Нефтегорске (1995 год) // Катастрофы конца XX века / под общ. ред. В.А. Владимирова; Мин-во РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. М., 2001. С. 53–69.
5. Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышенной вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С. 48–58. (Вычислит. сейсмология; вып. 19).
6. Коновалов А.В., Патрикеев В.Н., Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Семенова Е.П., Степнов А.А. Пильгунское землетрясение 12 июня 2005 г. ( $M_w = 5,6$ ) и современная сейсмичность в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 1. С. 61–71.
7. Кособоков В.Г., Кейлис-Борок В.И., Смит С.У. Локализация среднесрочного прогноза землетрясений // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312, № 2. С. 326–331.
8. Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С. и др. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 103 с.
9. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
10. Тихонов И.Н., Закупин А.С. Ретроспективная оценка применимости двухэтапной схемы краткосрочного прогнозирования землетрясений ( $M \geq 5$ ) южного Сахалина по данным детального каталога // Вестн. ДВО РАН. 2016. № 1 (185). С. 58–67.
11. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 303 с.

12. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. С. 66–93.
13. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
14. Feng Y., Ji G., Cui W. Parallel Computing for LURR of Earthquake Prediction // Intern. J. Geophys. 2012. Vol. 2012. Art. ID 567293.
15. Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M. Diagnosis of time increased probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN // Phys. Earth Planet. Inter. 1990. Vol. 61, N 1–2. P. 57–72.
16. Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Kononov A.V., Ottemoller L. New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data // Seismic Instruments. 2014. Vol. 50, N 1. P. 67–74.
17. Yin X.C. et al. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory // Pure Appl. Geophys. 1995. Vol. 145, N 3/4. P. 701–715.
18. 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 Appl. Geophys. 2001. Vol. 157, N 11/12. P. 2365–2383.
19. Yin X.-C., Yu H.-Zh., Kuksenko V., Xu Zh.-Y., Wu Zh., Li Min, Peng K., Elizarov S., Li Qi. Load/Unload Response Ratio (LURR), accelerating moment/energy release (AM/ER) and state vector saltation as precursors to failure of rock specimens // Pure Appl. Geophys. 2004. Vol. 161. P. 2405–2416. doi:10.1007/s00024-004-2572-8.