

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98

ФИЗИКА ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.34:528.2

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ( $M_w > 5$ ) НА САХАЛИНЕ МЕТОДОМ LURR**

**А. С. Закупин<sup>1</sup>, Е. П. Семенова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

<sup>2</sup> Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 693010, г. Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2А  
E-mail: dikii79@mail.ru

исследован сейсмический режим Южного Сахалина перед Крильонским землетрясением 23 апреля 2017 года ( $M_w = 5.0$ ). Проведены расчеты сейсмической опасности в рамках метода LURR (load-unload response ratio). По данным каталога локальной сети полевых станций определен признак подготовки землетрясения в конце 2015 года. Изучен процесс релаксации в очаговой зоне по данным афтершоковой активности в течение 2017 года.

*Ключевые слова: сейсмичность, прогноз землетрясений, разлом*

© Закупин А. С., Семенова Е. П., 2018

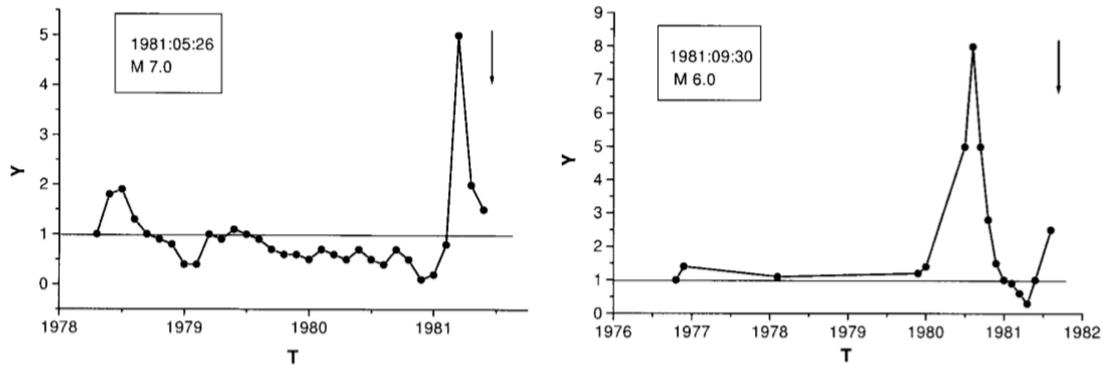
## Введение

Метод среднесрочной оценки сейсмической опасности, названный LURR, был предложен в 90-х годах прошлого века и в соответствии с [1], [2] успешно применен в различных сейсмически активных регионах (пример на рис.1).

Vol. 157, 2000

Load/Unload Response Ratio Theory

2373



2374

Xiang-Chu Yin *et al.*

Pure appl. geophys.,

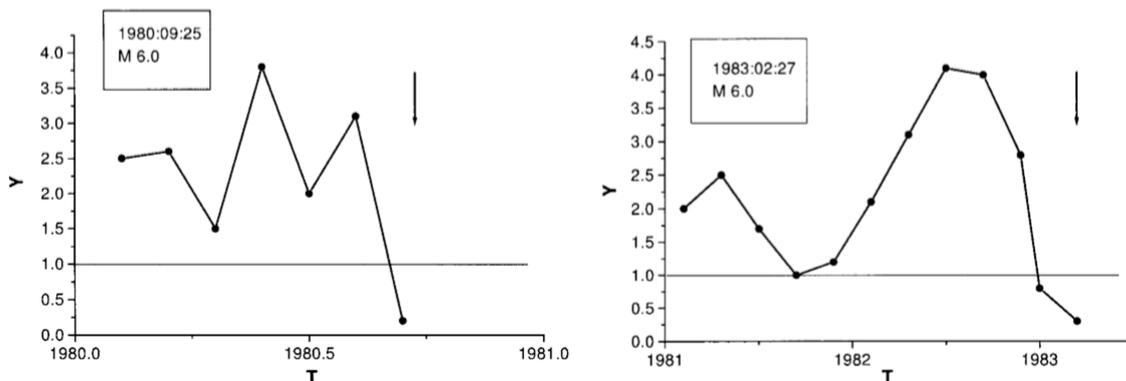


Рис. 1. Результаты применения метода LURR [1]

Методика была проверена в лабораторных экспериментах на трехосное сжатие. Эксперименты на разрушение образцов горных пород были проведены в комплексе с численным моделированием [3]. В Институте морской геологии и геофизики Российской Академии наук метод LURR используется с 2014 года. Было подготовлено специальное программное обеспечение [4] для расчетов и получен ряд важных результатов по оценке сейсмической опасности на Сахалине [5]-[7] и Новой Зеландии [8]. Результаты показаны на рис.2.

Границы зоны подготовки землетрясения с магнитудой выше 5 могут быть достаточно точно локализованы в зонах с линейными размерами 100-150 км [15]. В данной работе ретроспективно на примере Крильонского землетрясения (23.04.2017,  $M_w = 5.0$ ) будет разобрана поэтапная схема использования метода LURR. Кроме того, будет проведен анализ сейсмичности с помощью ряда стандартных методик (распределения событий и энергии, афтершоковые последовательности, шкала уровня сейсмичности «СОУС\*09») и проведено сопоставление с данными LURR.

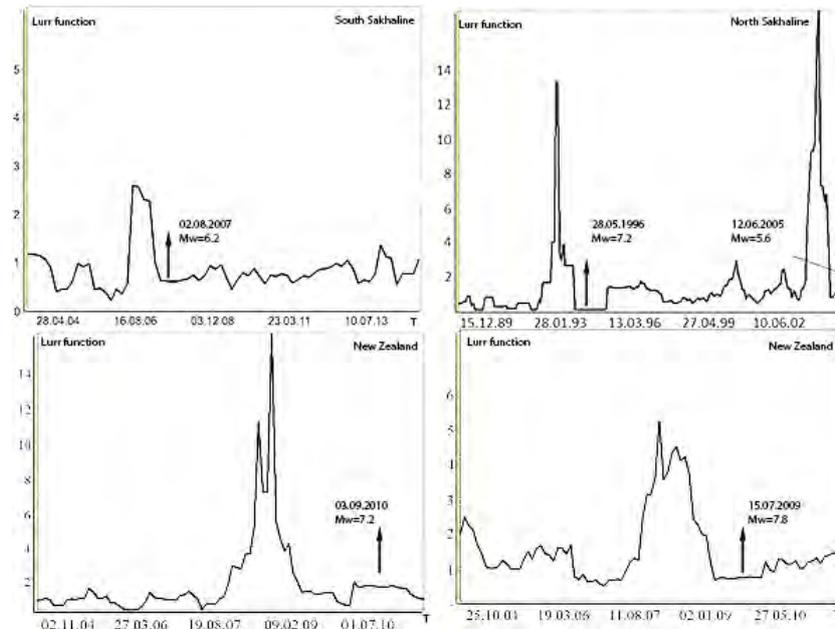


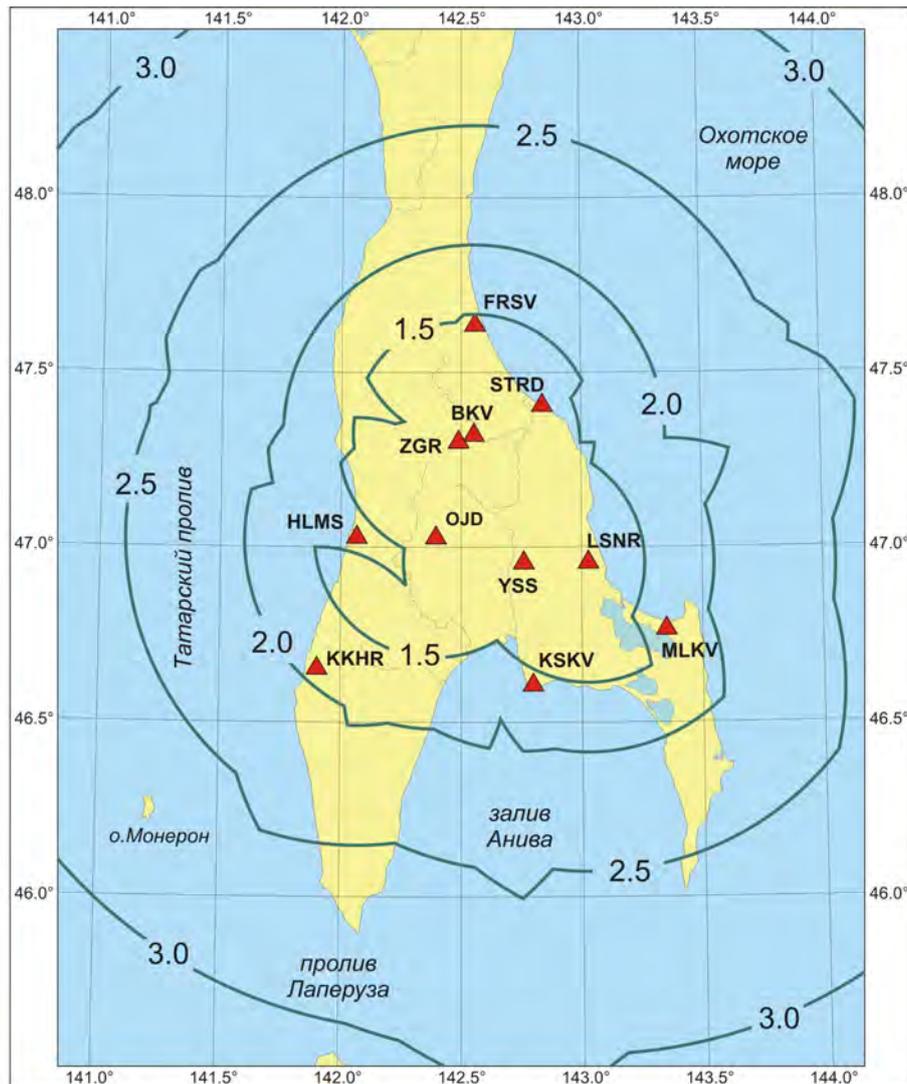
Рис. 2. Результаты расчетов по методу LURR для Сахалина и Новой Зеландии

Методика была проверена в лабораторных экспериментах на трехосное сжатие. Эксперименты на разрушение образцов горных пород были проведены в комплексе с численным моделированием [3]. В Институте морской геологии и геофизики Российской Академии наук метод LURR используется с 2014 года. Было подготовлено специальное программное обеспечение [4] для расчетов и получен ряд важных результатов по оценке сейсмической опасности на Сахалине [5]-[7] и Новой Зеландии [8].

## Методика

Отправной точкой метода LURR является эквивалентность реакции среды для состояний нагрузки и разгрузки при упругом состоянии  $X_+ = X_-$  (LURR = 1). По мере того, как повреждение материала становится значительным, и процесс выходит за пределы предела упругости, начинает увеличиваться параметр LURR. Это соотношение растет по мере приближения породы к фазе быстрого микротрещинообразования. Можно рассматривать этот процесс как критическое поведение, предшествующее потере устойчивости в очаге. Основные понятия и детали метода LURR изложены в статьях [2, 3, 9]. В своих расчетах мы использовали собственное программное обеспечение "Seis-ASZ", созданное в Институте морской геологии и геофизики РАН [4]. Программное обеспечение "Seis-ASZ" содержит оригинальные алгоритмы метода LURR, а также аналитические соотношения для расчета приливных деформаций [10, 11]. Результаты работы модуля для расчета приливных деформаций в программном комплексе "Seis-ASZ" были проверены с помощью классического пакета [12] и получена удовлетворительная сходимость. Для расчетов необходим сейсмический каталог.

На рис.3 приведена карта установки сейсмических станций локальной сети Южного Сахалина.



Регистрационные возможности локальной сети станций DAT-4 + LE-3Dlite на юге о. Сахалин в 2017г. (1.5, 2.0, 2.5, 3.0 - значения представительных магнитуд; ▲ - станции)

Рис. 3. Карта установки полевых сейсмических станций локальной сети по состоянию на 2017 г. Темными изолиниями отмечен уровень регистрационных возможностей

Непрерывные инструментальные наблюдения за слабой сейсмичностью на юге острова ведутся с 2001 года. Девять станций локальной сети укомплектованы регистраторами DAT-4 (производитель CloverTech, Япония) с короткопериодными сейсмометрами LE-3Dlite (производитель Lennartz electronic, Германия) и станция YSSR на базе регистратора Datamark LS7000XT (производитель Nukusan Corporation, Япония) [13, 14].

Получаемые данные используются для детального изучения сейсмичности юга острова Сахалин, в том числе, их используют для оценки сейсмической опасности.

## Результаты

Каталог событий для расчетов LURR включает землетрясения с магнитудой от 2 в период с 2010 по 12 апреля 2017 года. Параметры расчета функции LURR

стандартны для всех наших работ: окно – 360 дней, сдвиг – 60 дней, диапазон рабочих магнитуд – 3.3-5. Области для расчета первоначально выбирались размером в 1 градус по широте и долготе в полуосях эллипса, эллипсы выбирались с перекрытием в 1 градус (всего 9 зон). Исследуемая территория – весь южный Сахалин и север Хоккайдо (рис.4а).

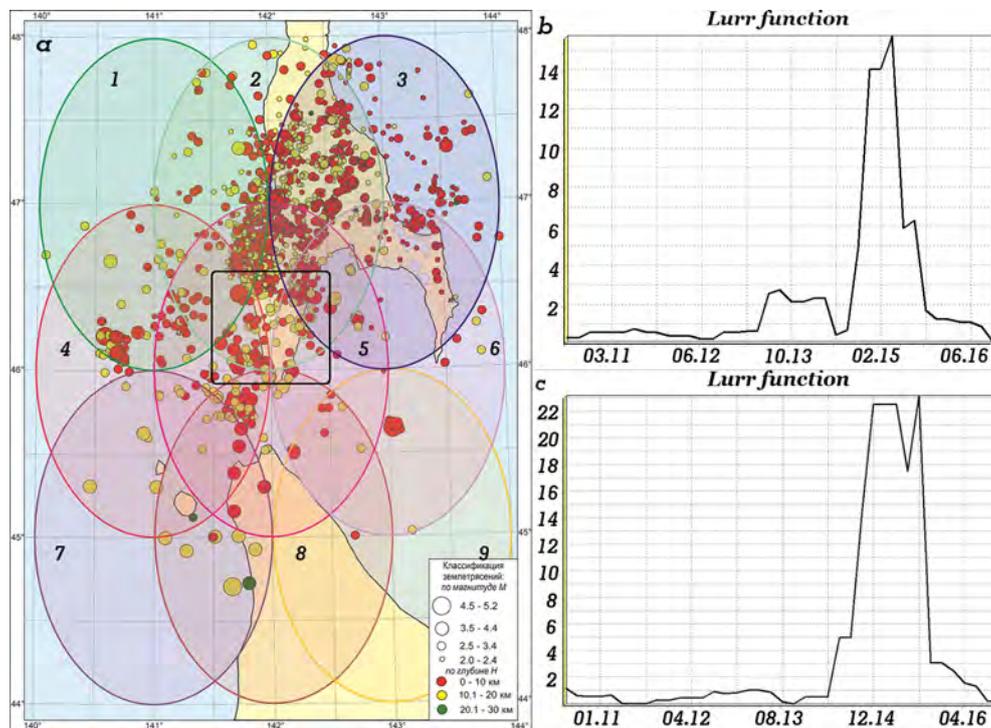


Рис. 4. Результаты расчетов. Показаны расчетные области и графики LURR

Такие размеры удовлетворяют подходу из оригинальных работ и нашему опыту [1], [7]. В зонах 4 и 5 были обнаружены признаки значительного превышения порога в апреле-мае 2015 года (пример результата по зоне 5 на рис.4b). Также незначительное увеличение, не превысившее  $3\sigma$ , фиксировалось в 2013 году. Путем перебора прямоугольных зон меньшего размера было установлено положение зоны, где максимально отражен предвестник 2015 года (рис.4c). Параметр LURR вернулся к фоновым значениям лишь к началу 2016 года. Фактически, в соответствие с положениями методики LURR в течение 2 лет после появления признака землетрясение с магнитудой 5 произошло именно в этой зоне. Рассмотрим результаты расчетов в зонах меньшего размера, в том числе зонах Западно-Сахалинского (ЗСР) и Центрально-Сахалинского (ЦСР) разломов. Аномальные значения LURR в 2013 году отмечены в нескольких зонах (рис.5а, рис.5b, рис.6с). Реально же они имеют отношение к зоне, показанной на рис.5b. Сейсмичность в данной зоне в целом слабая, но в конце 2013 года она значительно усилилась, что и позволило провести расчет. Отметим, что в этой зоне параметр LURR возрастает и в середине 2015 года. Также проявился локальный признак на восточной части п-ва Крильон (рис.6d) в 2012 году. Остальные результаты строго подтвердили параметры признака 2015 года, а также его отсутствие в сопряженной зоне (рис.6а). Полученные результаты также свидетельствуют о том, что сформировался признак в основном в зоне ответственности ЗСР (рис.5с). Отметим начало формирования

другой аномалии на рис.6а. Признак относится к зоне ответственности Центрально-Сахалинского разлома выше 46.5 градуса в.д. и рассмотрен подробно в работе [15].

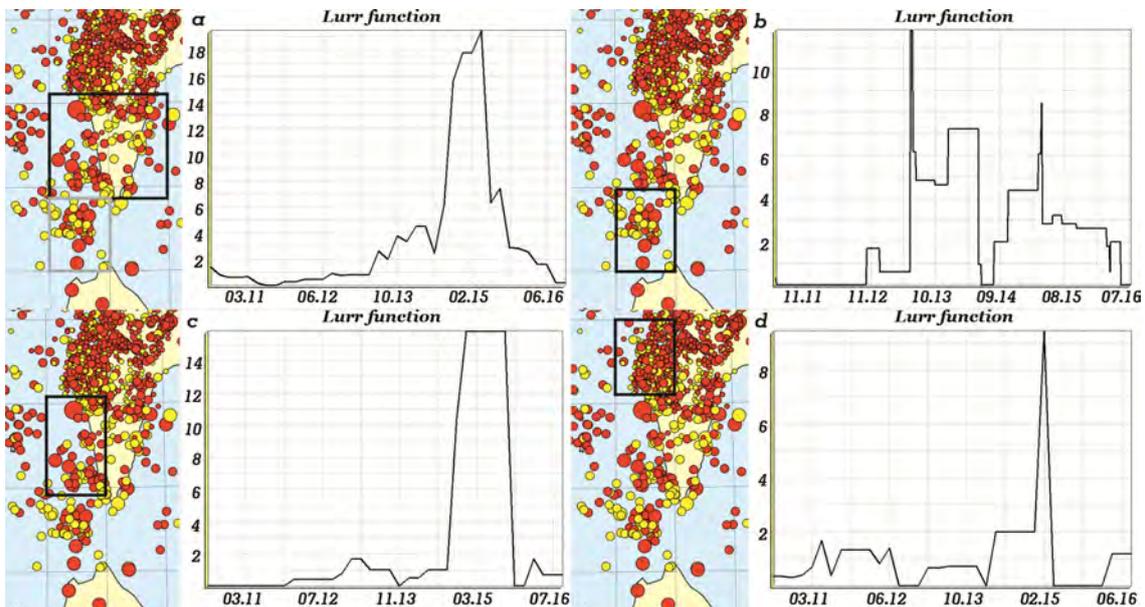


Рис. 5. Результаты расчетов. Показаны расчетные области и графики LURR

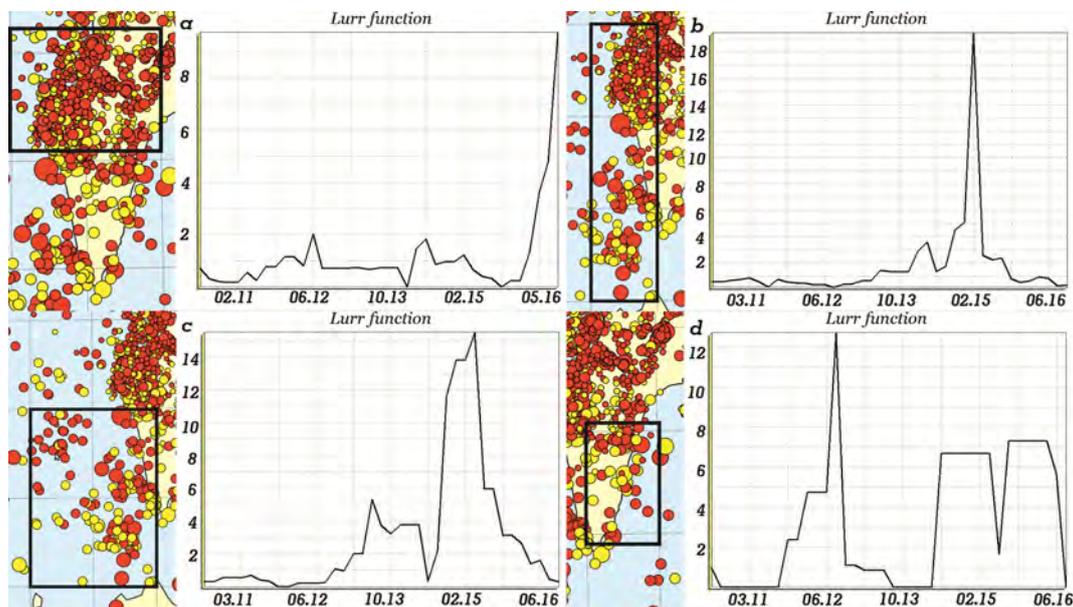


Рис. 6. Результаты расчетов. Показаны расчетные области и графики LURR

Для понимания результатов, которые получены методом LURR, проведем ряд дополнительных исследований сейсмического режима в исследуемой области.

### Сейсмичность 2010-2017 гг. на Южном Сахалине

На рис.7 приведена карта Южного Сахалина с эпицентрами землетрясений ( $M \geq 3.0$ ) по данным локальной сети полевых сейсмических станций за период

наблюдений с 2010 по 2017 гг. Красные кружки – эпицентры землетрясений с магнитудой  $M = 5.0$  и выше.

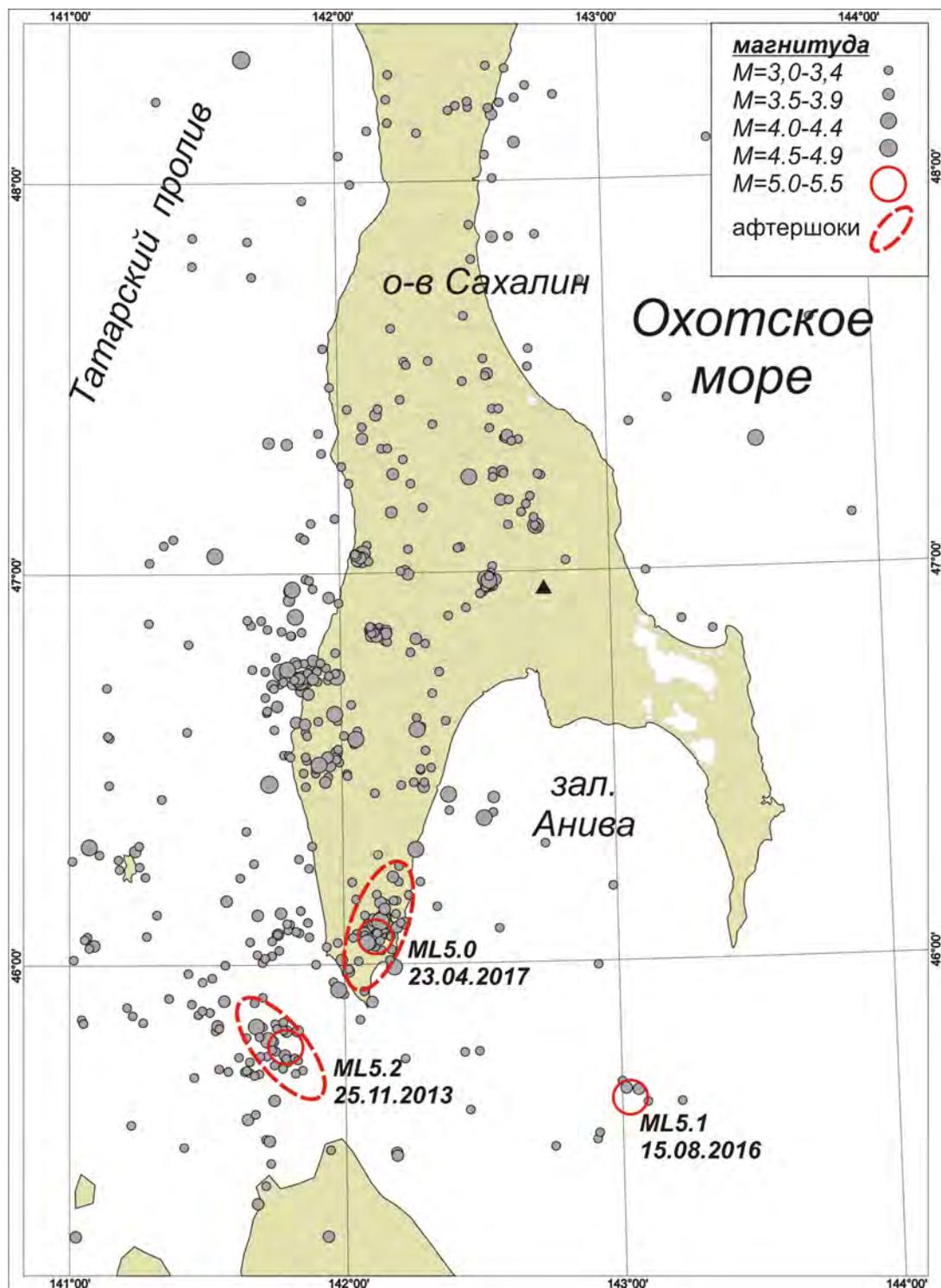


Рис. 7. Карта с эпицентрами землетрясений с магнитудой  $M \geq 3.0$  на Южном Сахалине за период с 2010 по 2017 гг. по данным каталога локальной сети полевых сейсмических станций. Красная пунктирная линия ограничивает афтершоковую зону сильных землетрясений с магнитудой  $M \geq 5.0$

Как видно из рис. 7 землетрясения с магнитудой  $M \geq 5.0$  произошли 25 ноября 2013 г., 15 августа 2016 г и 23 апреля 2017. Наибольший интерес в рамках данной работы представляет землетрясение 2017 г. с эпицентром в районе п-ва Крильон, которое имеет афтершоковое облако, которое оконтурено пунктирной линией. Эпицентр землетрясения 23 апреля 2017 года находился на западном побережье залива Анива. Отдельно стоит отметить, что глубина очага варьирует до 15 км, что говорит о его расположении в коре и соответствует основным данным о тектонике Южного Сахалина.

### Афтершоковая активность в эпицентральной зоне (землетрясения 23 апреля 2017г.

К рассмотрению эпицентральной зоны землетрясения 23 апреля 2017 года были привлечены каталоги землетрясений локальной сети полевых сейсмических станций. Всего было зарегистрировано 178 повторных толчков, из которых 8 событий имели магнитуду  $M \geq 4.0$ . Афтершок с наибольшим значением магнитуды  $M=4.7$  был зарегистрирован 31 октября. Очаги повторных толчков варьируют в интервале глубин от 10 до 12 км. Афтершоковая зона имеет северо-восточную направленность вдоль юго-восточного побережья полуострова Крильон (рис.8).

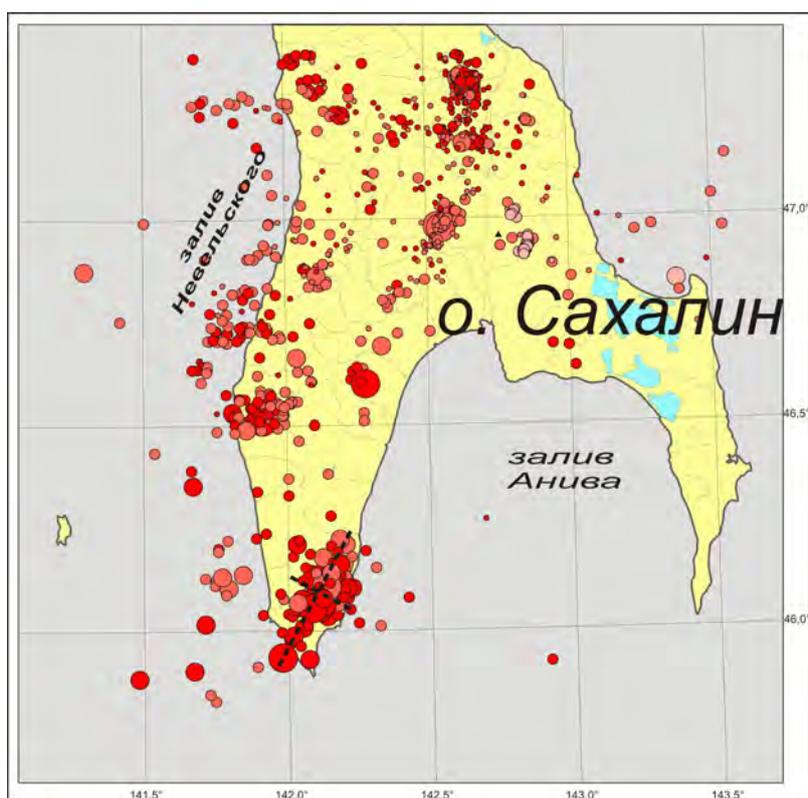


Рис. 8. Карта с эпицентром землетрясения 23 апреля 2017 года по данным локальной сети полевых станций Южного Сахалина с областью афтершоков

Весь афтершоковый процесс землетрясения 23 апреля 2017 г. можно разделить на 4 последовательности, каждая из которых возникала после очередного афтершока (рис.9)

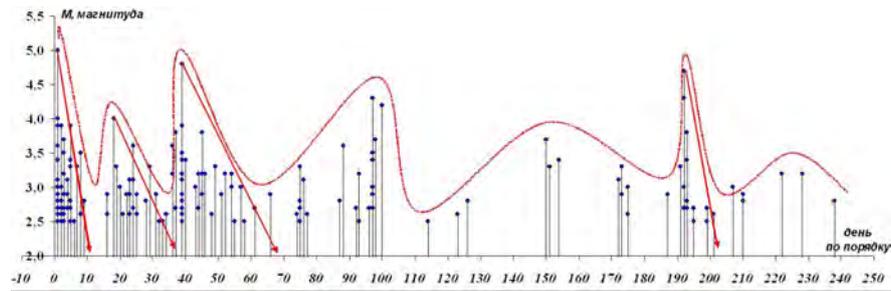


Рис. 9. Афтершоковый процесс землетрясения 23 апреля 2017 г. Красные пунктирные линии отмечают спадание сейсмической активности во времени. Вертикальная ось – значение магнитуды. На горизонтальной оси нумерация дней в порядке следования от даты главного толчка

### Тектонические особенности в эпицентральных зонах землетрясений 2013 и 2017 гг.

Как известно на основе геологических и геофизических данных на о-ве Сахалин и прилегающих акваториях выявлена густая сеть тектонических нарушений, ориентированных в меридиональном и субмеридиональном направлениях: Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский и Хоккайдо-Сахалинский разломы [17]. Кроме того, возникающие очаги сейсмичности связаны с оперяющимися и соответствующими нарушениями, и составлять широкую сеть, разветвленную на значительные расстояния

Оскорбиним Л.С. на основе совместного рассмотрения сейсмологических, структурно-тектонических и геофизических данных в районе п-ова Крильон были выделены три смежные сейсмогенные зоны: Юго-Западная Сахалинская шельфовая зона (ЮЗШ), Юго-Западная Сахалинская зона (ЮЗХ) и Анивская зона (АНВ) (рис.10)

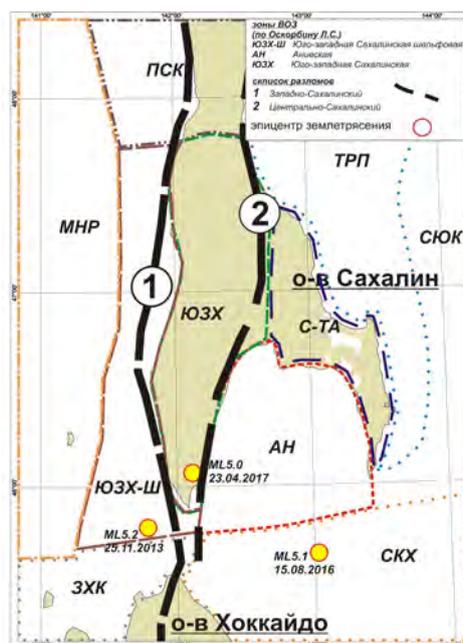


Рис. 10. Фрагмент схемы зон ВОЗ (возможных очагов землетрясений) [23]

Наиболее активная из них - Юго-Западная Сахалинская шельфовая зона, территория которой плотно покрыта эпицентрами землетрясений с магнитудой  $M=5.0\pm 0.1$ , наиболее сильные из которых произошли 18 июня 1919 г., 23 ноября 1936 г., 9 марта 1963 г., 21 марта 1978 г., 25 мая 1981 г. Сейсмическая активность в ЮЗШ определяется тектоническими особенностями системы Западно-Сахалинских разломов. Анивская зона включает в себя депрессию залива Анива, состоит из подводного продолжения структур Южно-Сахалинского синклинория и Сусунайско-Анивского антиклинория. Сейсмичность представлена немногочисленными землетрясениями с  $M < 4.0$ , эпицентры которых расположены вблизи границ с соседними зонами. ЮЗШ и АНВ зоны граничат с Юго-Западной Сахалинской зоной, основным дизъюнктом которой является Центрально-Сахалинской взбросо-надвиг, вдоль и вкрест которого имеются нарушения различной ориентации и протяженности. Основная сейсмичность отмечена в южном сегменте этой зоны, а максимальное землетрясение с  $M=5.5$  произошло в 1951 г. на глубине 10 км [16].

Возможно, что возникновение землетрясений 2013 и 2017 гг. на юге Сахалина следует рассматривать как взаимодействие основных тектонических структур – Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов. В рамках этого предположения не выглядит странным, что вариации LURR 2012 года в районе ЦСР (рис.6d) и 2015 года в районе ЗСР (рис.5с) могут быть определены, как признаки подготовки землетрясений 2013 года в районе ЗСР и 2017 года в районе ЦСР. Вариации LURR 2013 года (Рис.5b) вызваны серией землетрясений сосредоточенных в очень сильно локализованной зоне. Основной вклад в аномалию внесли афтершоки главного толчка 25 ноября 2013 г. В данном случае аномалия не может рассматриваться как подготовка будущего события. Незавершенность процесса “разгрузки” в данной очаговой зоне можно также увидеть на рис. 11, где показано распределение сейсмичности по магнитуде.

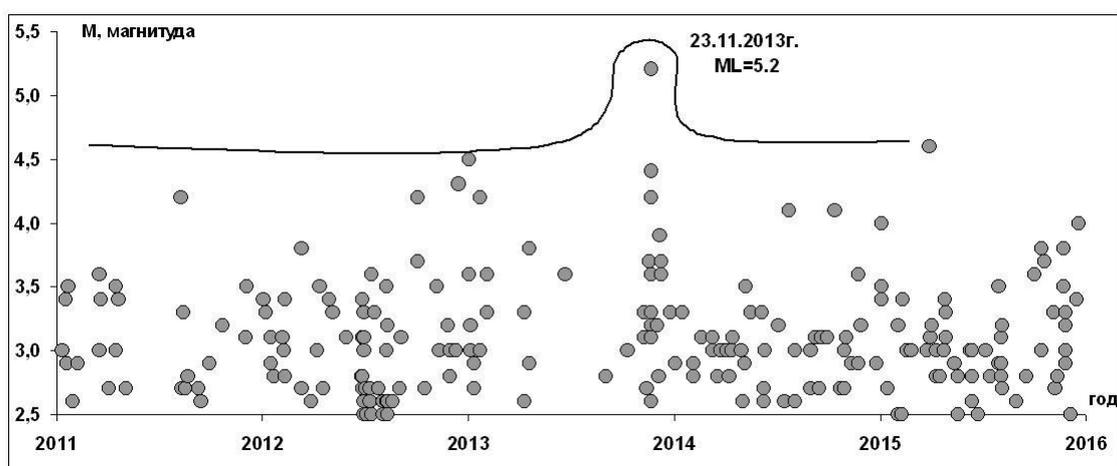


Рис. 11. Сейсмический процесс на юге Сахалина в 2011-2015 гг.

## Исследование сейсмичности на Южном Сахалине по методике СОУС\*09

Дополнительно, для оценки сейсмичности Южного Сахалина была использована методика СОУС\*09, изложенная в работах [18, 19]. В основе метода лежит построение эмпирической функции распределения суммарной сейсмической энергии, выделившейся за заданные интервалы времени:

$$F(K) = P(\lg E \leq K),$$

где  $F$  – эмпирическая функция распределения,  $E$  – суммарная сейсмическая энергия в Дж.

Для расчетов функций распределения  $\lg E$  (рис.12) использовались каталоги землетрясений Южного Сахалина по данным локальной сети полевых станций на юге острова в период наблюдений 2010–2017 гг. Использовалась осредненная функция распределения суммарной сейсмической энергии, выделившейся в течение месяца.

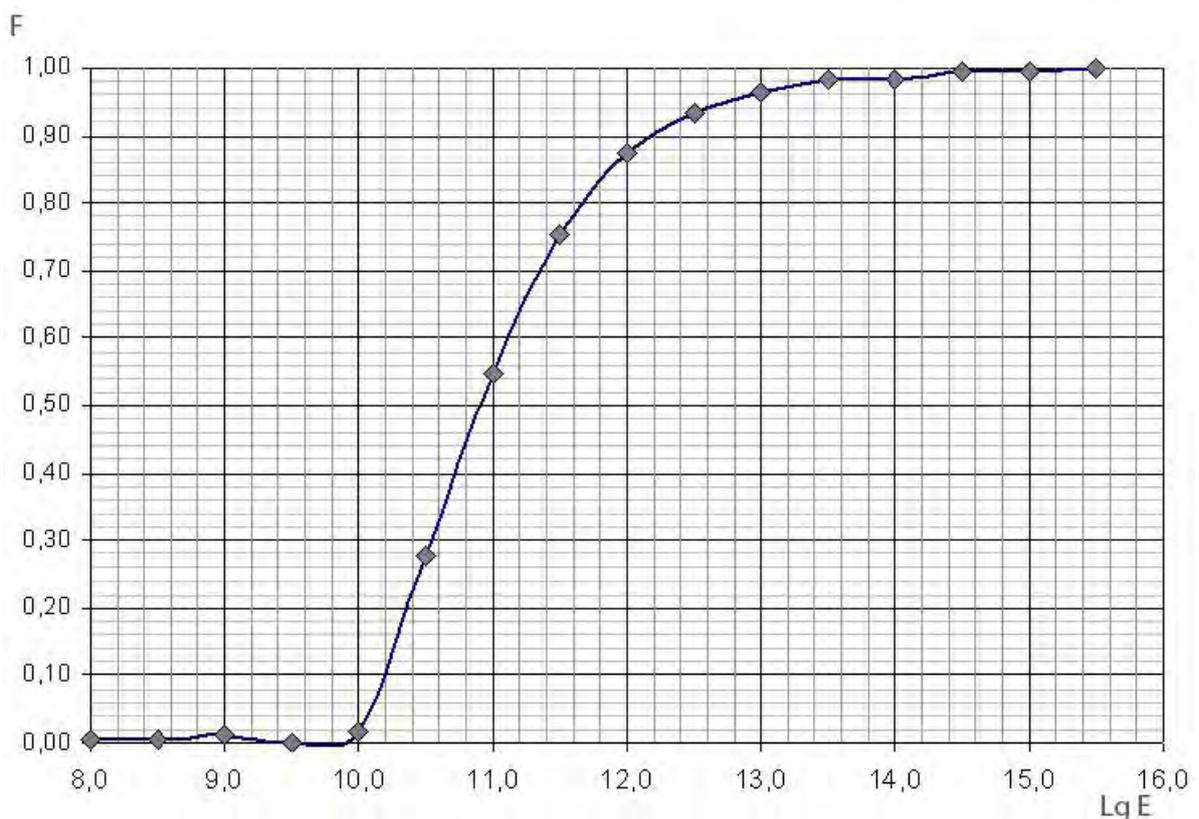


Рис. 12. Функция распределения  $F(\lg E)$ , рассчитанная по каталогам Южного Сахалина за период наблюдений 2010-2017 гг.

Уровень сейсмичности определялся по шкале, предложенной в работе [18], кроме того, были определены квантили функции распределения  $\lg E$ , соответствующие градациям шкалы СОУС\*09 (таблица).

Таблица

**Шкала уровня сейсмичности «СОУС\*09» и соответствующие значения десятичного логарифма месячной сейсмической энергии Южного Сахалина**

Градации уровня сейсмичности, основные	Градации уровня сейсмичности, дополнительные	Значения функции распределения $F(\lg E, \text{Дж})$	Квантили функции распределения $\lg E_{1\text{мес}}$
Экстремально низкий		$F < 0.005$	$\lg E < 9.69$
Низкий		$0.005 < F < 0.025$	$9.69 < \lg E < 10.02$
Фоновый	Фоновый пониженный	$0.025 < F < 0.15$	$10.02 < \lg E < 10.25$
	Фоновый средний	$0.15 < F < 0.85$	$10.25 < \lg E < 11.94$
	Фоновый повышенный	$0.85 < F < 0.975$	$11.94 < \lg E < 13.25$
Высокий		$0.975 < F < 0.995$	$13.25 < \lg E < 15.00$
Экстремально высокий		$F > 0.995$	$\lg E > 15.00$

Функция распределения  $\lg E$  (рис.13) была использована для анализа сейсмичности юга Сахалина в 2013–2017 гг. По каталогам землетрясений за период 2013–2017 гг. рассчитаны ежемесячные значения суммарной сейсмической энергии и определен уровень текущей сейсмичности, в соответствии со шкалой СОУС\*09. Результаты представлены на рис.13.

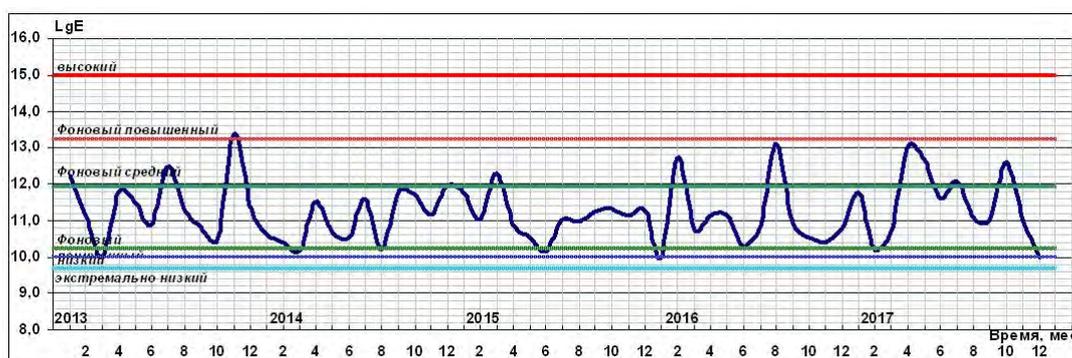


Рис. 13. Изменение  $\lg E$  в течение 2013–2017 гг. Сплошными горизонтальными линиями отмечены границы основной шкалы уровня сейсмичности, пунктирными – границы дополнительной шкалы

Высокий уровень сейсмичности в ноябре 2013 года (землетрясение 25 ноября 2013 г,  $M = 5.2$ ) предварялся повышенным фоновым в июле (землетрясение 4 июля 2013 г,  $M = 4.7$ ). Пик сейсмической активности в 2017 году пришелся на землетрясение 23 апреля  $M = 5.0$ , его афтершоки 31 мая  $M_w = 4.8$  и 31 октября  $M_w = 4.7$ . Интересный факт – в период формирования аномалии LURR – предвестника землетрясения 23 апреля 2017 года (2015 год) длительное время наблюдалась сейсмическая активность, которая не превышала фоновый средний уровень.

## Заключение

В работе проведен ретроспективный расчет параметра LURR перед Крильонским землетрясением 23 апреля 2017 года. В дополнение к предыдущим работам

показана хорошая точность метода для оценки сейсмической опасности на Сахалине. Отметим, что все расчеты (в том числе и в предыдущих работах) выполнены при неизменных параметрах математической обработки, принципах выделения расчетной области и выбора сейсмических событий. При этом в результатах стабильны определения зоны подготовки и времени ожидания, которое не превышает 24 месяца.

## Список литературы

- [1] Yin X.C. et al., "A new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory", *Pure Appl. Geophys.*, 1995, № 145, 701-715.
- [2] Yangde F., Guoliang Ji, Wenkai Cui, "Parallel Computing for LURR of Earthquake Prediction", *International Journal of Geophysics*, 2012, № 3.
- [3] 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, № 157, 2365-2383.
- [4] Закупин А. С., *Seis-ASZ*, Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2016611230, 28 января 2016 г. [Zakupin A. S., *Seis-ASZ*, Svidetel'stvo ob oficial'noi registratsii programmy dlya EVM № 2016611230, 28 yanvaryaya 2016 g.].
- [5] Закупин А. С., "Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса", *Геоинформатика*, 2016, № 1, 34-43. [Zakupin A. S., "Programmnyi kompleks dlya analiza neusoychivosti seismicheskogo protsesssa", *Geoinformatika*, 2016, № 1, 34-43].
- [6] 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(185), 58-67. [Tikhonov I. N., Zakupin A. S., "Retrospektivnaiy otsenka primenimosti dvukhetapnoi skhemy kratkosrochnogo prognozirovaniya zemletrayseniy ( $M \geq 5$ ) yuzhnogo Sakhalina (po dannym detal'nogo kataloga)", *Vestn. DVO RAN*, 2016, № 1(185), 18-25].
- [7] Закупин А. С., Жердева О. А., "Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для северного Сахалина", *Вестн. ДВО РАН*, 2017, № 1(191), 18-25. [Zakupin A. S., Zherdeva O. A., "Retrospektivnaiy otsenka primenimosti metodov srednesrochnogo prognozirovaniya zemletrayseniy dlya severnogo Sakhalina", *Vestn. DVO RAN*, 2017, № 1(191), 18-25].
- [8] 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(3), 40-49. [Zakupin A. S., Kamenev P. A., "O vozmozhnosti prostranstvenno-vremennoi lokalizatsii povyshennoi seismicheskoi opasnosti v metodike srednesrochnogo prognoza LURR", *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2017, № 3(3), 40-49].
- [9] Yin X. C., Yu H. Z., Kuksenko V., Xu Z. Y., Wu Z., Min Li M, Keyin Peng, Elizarov S., Qi Li., "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.*, **16** (2004), 2405-2416.
- [10] Lockner D. A., Beeler N. M., "Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes", *J. Geophys. Res.*, **104** (1999), 133-20151.
- [11] Munk W. H., Cartwright D. E., "Tidal Spectroscopy and Prediction", *Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A.*, **259** (533-581).
- [12] Berger J., Farrell W., Harrison J. C., Levine J., Agnew D. C., *ERTID 1: A program for calculation of solid Earth tides*, Publication of the Scripps Institution of Oceanography, 1987.
- [13] Ким Ч. У., Семенова Е. П., Жердева О. А. и др., *Каталог землетрясений юга острова Сахалин за период с 2000 по 2010 гг. (по данным автономных цифровых сейсмических станций)*, Дальнаука, Владивосток, 2011, 385 с. [Kim Ch. U., Semenova E. P., Zherdeva O. A. i dr. Katalog zemletrajasenij ostrova Sahalin za period 2000-2010.(po dannym avtonomnyh seismicheskikh stantsij), Dalnauka, Vladivostok, 2011, 385 pp.]

- [14] Левин Ю. Н., Михайлов В. И., Семенова Е. П., “Современное состояние сейсмологических наблюдений на Сахалине”, *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*, Материалы Девятой Международной сейсмологической школы, ГС РАН, Обнинск, 2014, 200-204. [Levin J. N., Mihajlov V. I., Semenova E. P., “Sovremennoe sostojanie seismologicheskikh nabljudenij na Sakhaline”, *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannyh*, Materialy Devjatoj Mezhdunarodnoj sejsmologicheskoi shkoly, GS RAN, Obninsk, 2014, 200-204.].
- [15] Закупин А. С., Каменев П. А., Воронина Т. Е., Богинская Н. В., “Среднесрочный прогноз сейсмической опасности по югу Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога)”, *Геосистемы переходных зон*, 2:1 (2018), 52-56. [Zakupin A. S., Kamenev P. A., Voronina T. E., Boginskaya N. V., “Srednesrochniy prognoz seismicheskoi opasnosti po yugu Sakhalina na 2018 god (po dannym operativnogo kataloga)”, *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2017, № 3(3), 40-49].
- [16] Оскорбин Л. С., “Сейсмогенные зоны Сахалина”, *Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона*. Т. VI, Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией, Южно-Сахалинск, 1997, 154-178. [Oskorbin L. S., “Seismogennye zony Sakhalina”, *Problemy seismicheskoi opasnosti Dalnevostochnogo regiona*. V. VI, Geodinamika tektonosfery zony sochlenenija Tihogo okeana s Evraziej, IMGiG DVO RAN, Juzhno-Sahalinsk, 1997, 154-178].
- [17] Харахинов В. В., *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*, Научный мир, М., 2010, 276 с. [Kharakhinov V. V., *Neftegazovaya geologiya Sakhalinskogo regiona*, Nauchniy mir, M., 2010, 276 pp.]
- [18] Салтыков В. А., “Методика вероятностной оценки регионального уровня сейсмичности”, *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*, Труды Второй региональной научно-технической конференции 11-17 октября 2009 года, КФ ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 2009, 82-85. [Saltykov V. A., “Metodika verojatnostnoj otsenki regionalnogo urovnja seismichnosti”, *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii*, Trudy Vtoroj regionalnoj nauchno- tehnichejskoj konferentsii 11-17 oktjabrja 2009 g, KF GS RAN, Petropavlovsk-Kamchatskij, 2009, 82-85].
- [19] Салтыков В. А., Кравченко Н. М., Пойгина С. Г., “Оценка уровня сейсмической активности регионов России”, *Землетрясения России в 2008 году*, ГС РАН, Обнинск, 2010, 57-63. [Saltykov V. A., Kravchenko N. M., Pojgina S. G., “Otsenka urovnja seismicheskoi aktivnosti regionov Rossii”, *Zemletrjasenija Rossii v 2008 godu*, GS RAN, Obninsk, 2010, 57-63].

## Список литературы (ГОСТ)

- [1] Yin X. C. et al. A new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory // *Pure Appl. Geophys.* 1995. no.145. pp. 701-715.
- [2] Yangde F., Guoliang Ji, Wenkai Cui. Parallel Computing for LURR of Earthquake Prediction // *International Journal of Geophysics.* 2012. no. 3.
- [3] 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. no. 157. pp. 2365-2383.
- [4] Закупин А. С. Seis-ASZ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2016611230, 28 января 2016 г.
- [5] Закупин А. С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса // *Геоинформатика.* 2016. №1. С. 34-43.
- [6] 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.* №1(185). 2016. С. 58-67.
- [7] Закупин А. С., Жердева О. А. Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для северного Сахалина // *Вестн. ДВО РАН.* 2017. №1(191). С. 18-25.

- [8] 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(3). С. 40-49.
- [9] Yin X. C., Yu H. Z., Kuksenko V., Xu Z. Y., Wu Z., Min Li M., Keyin Peng, Elizarov S., Qi Li. 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. 16. pp. 2405–2416.
- [10] Lockner D. A., Beeler N. M. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes // J. Geophys. Res. 1999. vol. 104. pp. 133-20151.
- [11] Munk W. H., Cartwright D. E. Tidal Spectroscopy and Prediction // Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A. 1966. vol. 259. pp. 533-581.
- [12] Berger J., Farrell W., Harrison J. C., Levine J., Agnew D. C. ERTID 1: A program for calculation of solid Earth tides. Publication of the Scripps Institution of Oceanography. 1987.
- [13] Ким Ч. У., Семенова Е. П., Жердева О. А. и др. Каталог землетрясений юга острова Сахалин за период с 2000 по 2010 гг. (по данным автономных цифровых сейсмических станций). Владивосток: Дальнаука, 2011. 385 с.
- [14] Левин Ю. Н., Михайлов В. И., Семенова Е. П. Современное состояние сейсмологических наблюдений на Сахалине. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 200-204.
- [15] Закупин А. С., Каменев П. А., Воронина Т. Е., Богинская Н. В. Среднесрочный прогноз сейсмической опасности по югу Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога) // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. №1. С. 52-56.
- [16] Оскорбин Л. С. Сейсмогенные зоны Сахалина. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. VI. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 154-178.
- [17] Харахинов В. В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
- [18] Салтыков В. А. Методика вероятностной оценки регионального уровня сейсмичности. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции 11-17 октября 2009 года. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. 2009. С. 82-85.
- [19] Салтыков В. А., Кравченко Н. М., Пойгина С. Г. Оценка уровня сейсмической активности регионов России. Землетрясения России в 2008 году. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 57-63.

**Для цитирования:** Закупин А. С., Семенова Е. П. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ( $M_w > 5$ ) на Сахалине методом LURR // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 5(25). С. 83-98. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98

**For citation:** Zakupin A. S., Semenova E. P. Study of the process of preparation of strong earthquakes ( $M_w > 5$ ) on Sakhalin using the LURR method, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **25**: 5, 83-98. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98

Поступила в редакцию / Original article submitted: 10.10.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98

PHYSICS OF EARTHQUAKE PRECURSORS

MSC 86A15

## **STUDY OF THE PROCESS OF PREPARATION OF STRONG EARTHQUAKES ( $M_w > 5$ ) ON SAKHALIN USING THE LURR METHOD**

**A. S. Zakupin<sup>1</sup>, E. P. Semenova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch RAS, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauki str., 1B, Russia

<sup>2</sup> Sakhalin Branch of Federal Research Center Geophysical Survey RAS, 693010, Yuzhno-Sakhalinsk, Tihookeanskaya str., 2A, Russia

E-mail: dikii79@mail.ru

the seismic regime of southern Sakhalin before the Krillon earthquake on April 23, 2017 ( $M_w=5.0$ ) was Investigated. Seismic hazard calculations were carried out within the framework of the LURR (load-unload response ratio) method. According to the catalog of the local network of field stations, the precursor of earthquake preparation at the end of 2015 was determined. The process of relaxation in the focal zone was studied according to the data of aftershock activity during 2017.

*Key words: seismicity, earthquake prediction, fault.*

© Zakupin A. S., Semenova E. P., 2018