

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА LURR ДЛЯ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧНОСТИ ЮЖНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

*А.С. Закупин, М.Ю. Андреева*

*ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;  
e-mail: a.zakupin@imgg.ru, andreeva-mu@mail.ru*

Поступила в редакцию 15 сентября 2020 г.

В работе предложен подход к анализу сейсмических последовательностей для Южных Курильских островов методом LURR (load/unload response ratio). Выбраны оптимальные параметры для проведения расчётов на примере круговой области, центром которой является эпицентр Шикотанского землетрясения 4.10.1994 г. Расчёты проведены ещё для двух сильнейших землетрясений прошлого столетия 11.08.1969 и 24.03.1978 годов. Во всех случаях найдены аномалии параметра LURR за несколько лет перед землетрясениями. Для проверки устойчивости полученных аномалий исследованы несколько зон вблизи эпицентров проверяемых событий. Показано, что аномалии неустойчивы, могут появляться в разные времена или пропадать вовсе. Эффективность прогноза проверена на эпицентральной области Шикотанского землетрясения за период 1965–2020 гг. За указанный период было зафиксировано шесть аномалий, пять из которых предвещали близкие или включенные в расчетную область землетрясения с магнитудой  $m_b \geq 6.5$ , а также по одной ложной тревоге и пропущенной цели.

**Ключевые слова:** сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, каталог землетрясений, Курильские острова.

### ВВЕДЕНИЕ

Курило-Камчатский сейсмический пояс расположен над зоной субдукции Западно-Тихоокеанской плиты под Евроазиатскую и представляет собой активную сейсмогенную зону, охватывающую литосферу островного склона одноименного глубоководного желоба. Ее длина от южного побережья о-ва Хоккайдо до Берингова моря около 2000 км. Основное число очагов Курило-Камчатских землетрясений (в том числе практически всех сильнейших) приурочены к крутому северо-западному борту и удалены от Большой Курильской гряды в среднем на 100–150 км [2, 26].

При районировании Курил по площади выделяют три блока. К Южному Курильскому блоку следует отнести острова Большой гряды Кунашир, Итуруп, Уруп, острова Малой Курильской гряды с прилегающим к ним шельфом и северо-восточную часть Хоккайдо. К Среднему Курильскому блоку относятся небольшие острова средней части Большой гряды от Симушира до Шикотана, а к Северному - Харимкотан, Онекотан, Парамушир и Шумшу [20, 26]. Наибольшее количество землетрясений было зарегистрировано за весь период инструментальных

наблюдений в первой зоне, наименьшее во второй, центральной. Максимальная сейсмическая энергия приходится на южную часть и прилегающую часть глубоководной котловины [22].

Далее будем рассматривать землетрясения только Южно-Курильского региона.

По инструментальным данным в рассматриваемом регионе и прилегающих к нему участках за период с 1911 по 2020 гг. отмечено 9 землетрясений, которые относят обычно к разряду сильнейших (с магнитудой  $M > 7.7$ ) [1]. Такие землетрясения обычно связываются с перемещением по разрыву значительных участков литосферы и характеризуются глубинами очагов 30–40 км. Эпицентры мелкофокусных землетрясений за рассматриваемый отрезок времени распределяются неравномерно. Участки относительно повышенной плотности приурочены к тыловым частям Южных Курил, где произошли сильнейшие события: Итурупские (07.09.1918 г.,  $M = 8.2$ ; 08.11.1918 г.,  $M = 7.9$ ; 06.11.1958 г.,  $M = 8.2$ ), Токачи (04.03.1952 г.,  $M = 8.3$ ), Урупское (13.10.1963 г.,  $M = 8.1$ ), Шикотанские (11.08.1969 г.,  $M = 8.2$ ; 04.10.1994 г.,  $M = 7.9$ ), Малокурильское (17.06.1973 г.,  $M = 7.9$ ), рой

землетрясений вблизи о-ва Итуруп (22–24.03.1978 г.,  $M = 7.1-7.7$ ) [1, 19].

Разрушительная сила землетрясений представляет для жителей региона серьезную опасность, и поэтому прогноз землетрясений – это ответственная и трудная задача, над которой работают много геофизиков. Сами прогнозы носят вероятностный характер. Если разделить прогнозы по временному ранжированию, то различают следующие их виды: долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный. При долгосрочном сейсмическом прогнозе землетрясение прогнозируется на большой территории, и время ожидания растягивается на годы [30]. Среднесрочный прогноз осуществляется на ближайшие несколько лет. В этом случае землетрясение прогнозируется на небольшой площади [4, 14]. Краткосрочный прогноз охватывает период ближайших дней и даже часов [14, 15].

Существует достаточно много методов долгосрочного сейсмического прогноза, которые описаны в [10, 16, 17, 24, 25] и других работах.

Первый метод долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии основан на знании выявленных закономерностей расположения очагов сильнейших землетрясений и свойств сейсмического цикла. В первых основополагающих работах было определено понятие сейсмических брешей, сейсмического цикла землетрясений с  $M > 7.7$  и его трех стадий: афтершоков, стабилизации и форшоков [29, 30]. В последующих работах уточнен способ построения границ областей землетрясений и введена вероятность возникновения землетрясений с  $M > 7.7$ . Области очагов японского и курило-камчатских событий, произошедших в 6.5.1968 г., 11.8.1969 г., 15.12.1971 г., 17.6.1973 г. и 22–24.03.1978 г. (рой), 4.10.1994 г. заполнили предсказанные места [31].

Но, несмотря на успешные реализованные прогнозы, некоторые исследователи считают, что в этих рамках невозможно точное прогнозирование, если не учитывать данные как о сейсмичности (краевой и/или кольцевой и «удаленной»), так и о закономерностях размещения сейсмических брешей 1, 2 родов, землетрясений – дуплетов, мультиплетов, пар землетрясений, а также миграции очагов [3].

Другой метод долгосрочного прогноза, примененный для Курило-Камчатского региона, – это метод выявления циклических возникновения сильных землетрясений, разработанный И.Н. Тихоновым в 2004 г. и опробованный ретроспективно [27].

В настоящее время очень много внимания уделяется именно среднесрочным и краткосрочным прогнозам. Рассмотрим наиболее известные алгоритмы

среднесрочных прогнозов, которые были применены к Курильскому и Камчатскому регионам.

Алгоритм среднесрочных прогнозов землетрясений M8, разработанный для прогнозирования экстремальных событий с  $M > 8.0$  еще в начале 1990 гг., и алгоритм M8-MSc доказали свою высокую значимость. Найденные по этим алгоритмам предвестники в районе Южных Курильских островов и о-ва Хоккайдо были реализованы 04.10.1994 г. [9] и 11.03.2011 г. [11].

Алгоритм Q1 основан на анализе сейсмических затиший и вариациях параметров графика повторяемости для реализации сквозной схемы прогноза – от среднесрочного до краткосрочного – сильнейших землетрясений Южных Курил. Он предназначен для выявления тревожного режима на заключительной стадии подготовки сильных землетрясений с  $M > 7.5$  [15].

Прогностический алгоритм КОЗ (карта ожидаемых землетрясений) направлен на получение значения условной вероятности возникновения сильного землетрясения на определенный период. Результаты многолетнего тестирования в Камчатском регионе показали значения условной вероятности больше 70 % [4].

Параметр RTL является прогностическим признаком, в основе которого заложена идея о том, что в очаге будущего землетрясения последовательно сменяются две стадии: затишье и сейсмическая активизация, а вот форшоковую активизацию выделить не всегда удается [23]. Алгоритм ретроспективно использовался для прогноза сильных событий на Камчатке, и в 68 % прогноз оправдался [24].

Методика краткосрочного прогноза сильных землетрясений по потоку слабых сейсмических событий с помощью методики саморазвивающихся процессов разрабатывалась авторами [15] для Курило-Охотского региона, Японии и о-ва Сахалин в 1997 г. Была показана эффективность прогнозирования эпицентральных областей, а точность моментов возникновения землетрясений разных масштабных уровней ретроспективно составила несколько суток.

В основе алгоритма RTP, разработанного в 2003 г., лежит явление увеличения радиуса корреляции сейсмичности перед землетрясением. За период тестирования алгоритма авторами [32] (с конца 2004 г. по 2019 г.) в Курило-Камчатском регионе произошло 7 землетрясений с  $M > 7.2$  и выше, из них два оказались вне области тревоги.

Метод Виера, Висса – ZMAP-метод, предназначенный для картирования сейсмических затиший, был модифицирован автором работы [28] для применения его на большой территории в реальном времени. С помощью этого метода, например, 1.7.2002 г.

была выявлена опасная зона в районе мыса Эримо (о-в Хоккайдо) – и прогноз оправдался 26.09.2003 г.

Еще один метод среднесрочного прогноза рассмотрим подробнее – это метод LURR, который связывает появление предвестника будущего землетрясения (аномалии) с подготовкой в предполагаемой зоне землетрясения с магнитудой выше верхней границы расчетной выборки сейсмических событий. Исследователи [36, 40] отмечают, что период тревоги с момента обнаружения аномалии может составлять несколько лет, а землетрясение должно произойти в расчетной области (радиусом  $1^\circ$  или 100 км в линейном размере). Метод был разработан китайскими сейсмологами в 90-х годах [37–39] и в последние несколько лет применяется в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) для о-ва Сахалин. По этому методу были выявлены аномалии, которые являются предвестниками землетрясений с магнитудой больше 5.5 [6–8]. После возникновения аномалий (в 7-ми районах острова) в течение не более 2-х лет произошли сильные сейсмические события. В 5-ти случаях аномалии были определены ретроспективно, а 2 из 7-ми зон были выявлены в режиме оперативных расчетов (такие проводятся ИМГиГ ДВО РАН с 2015 г.) [6, 7]. Отметим, что на острове за последние тридцать лет среди сильных землетрясений лишь одно (Горнозаводское 17.08.2006 г.,  $M = 5.6$ ) было пропущено – не имело предвестника в виде аномалии, рассчитанной по методу LURR.

Такие результаты, очевидно, нуждаются в трансляции на другие сейсмоактивные регионы планеты. Сейсмический режим на Курильских островах отличается от такового на о-ве Сахалин. Цель данной работы – изучить возможность применения метода LURR для оценки сейсмической опасности на Южных Курильских островах; задача – разработать подход к применению метода, выбрать наиболее оптимальные параметры расчетов, чтобы получить минимальное количество ложных тревог и пропущенных целей. Необходимо понять, для каких землетрясений может быть полезен данный метод как прогностический, и выработать рекомендации по его применению.

#### МЕТОДИКА И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При обосновании метода LURR исследователи предполагали [38], что прогнозным признаком приближения к разрушению сплошной среды в области очага землетрясения является увеличение некоторого параметра, что характеризует выход нагрузочной кривой  $\sigma = f(\varepsilon)$  за пределы пропорциональности (закон Гука). Авторами [38] подразумевается, что нагрузочная кривая для главного напряжения и главной дефор-

мации (одной из компонент этих тензорных величин) может описывать поведение материала среды в области значительно больших размеров, чем размер готовящегося очага, под воздействием лунно-солнечных приливов.

Независимо от китайских сейсмологов в работах А.В. Николаева рассматривались также взаимосвязи землетрясений и фаз приливных возмущений [18]. И китайские, и российские работы, в которых несколько различаются методики статистического анализа, дали сходный результат. В методе LURR внимание обращено на различие деформационных откликов среды на разных фазах прилива. Необходимым условием для появления такого различия является нелинейность зависимости  $\sigma(\varepsilon)$ , появление которой связывалось с процессом накопления повреждений

$$\sigma(\varepsilon) = E_0 [1 - D(\varepsilon)] \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – главное действующее напряжение;  $\varepsilon$  – соответствующая ему компонента деформации,  $E_0$  – модуль упругости;  $D$  – мера поврежденности материала, введенная в [35]. Параметр  $D$  увеличивается с ростом  $\varepsilon$  от 0 до 1, в некоторых работах, например [13], зависимость  $D$  от времени увязывается с накоплением микротрещин. Неупругость среды определяет различие изменений деформации  $\delta\varepsilon_+$ ,  $\delta\varepsilon_-$  (плюс и минус определяют направление градиента приливной волны). При увеличении и уменьшении напряжения на одну и ту же величину  $\delta\sigma$  рассматриваются абсолютные величины всех изменений. Количественной характеристикой неупругости деформации на данной стадии процесса может служить отношение деформационных откликов на пригрузку и разгрузку  $R_\varepsilon$ :

$$R_\varepsilon = \frac{\delta\varepsilon_+ / \delta\sigma}{\delta\varepsilon_- / \delta\sigma} = \frac{\delta\varepsilon_+}{\delta\varepsilon_-}. \quad (2)$$

Отношение  $R_\varepsilon$  можно выразить через величины, входящие в (1), с помощью следующей формулы (простые выкладки опущены)

$$R_\varepsilon = 1 + \frac{2\sigma}{E_0(1-D)} \frac{dD/d\varepsilon}{d\sigma/d\varepsilon}. \quad (3)$$

В отсутствие накопления дефектов с ростом деформации (или напряжения) производная  $dD/d\varepsilon = 0$ , и  $R_\varepsilon = 1$ . Выражение (3) показывает, что значения  $R_\varepsilon$  могут заметно отличаться от единицы лишь на участке пластического деформирования, когда наклон касательной к графику деформационной кривой существенно уменьшается, и, кроме того, сама деформация  $\varepsilon = \sigma/[E_0(1-D)]$  конечна. В терминах недавней работы [12] это условие можно перефразировать как снижение эффективной жесткости вмещающей среды. В точке перехода к запредельному деформированию, где  $d\sigma/d\varepsilon = 0$ , выражение для  $R_\varepsilon$  теряет корректность,

разрушение в среде (землетрясение) происходит уже на запредельном участке деформирования. Это предопределяет то, что деформационный отклик  $R_\epsilon$  (признак нарастания пластических деформаций) может быть информативен как среднесрочный (недели – месяцы), но не краткосрочный предвестник сильного землетрясения (часы – дни).

В работах [37–39] было предложено рассматривать вместо отношения деформационных откликов  $R_\epsilon$  параметр LURR: отношение откликов потока сейсмических событий на тестовую пригрузку и разгрузку. В качестве тестовых изменений напряжения были выбраны лунно-солнечные приливы. Параметр LURR,  $Y_m$ , введен для аддитивных величин: сейсмической энергии, деформации Беньоффа и накопления сейсмических событий при помощи следующего соотношения

$$Y_m = \sum_{i=1}^{N^+} (E_i^m)_+ / \sum_{i=1}^{N^-} (E_i^m)_-. \quad (4)$$

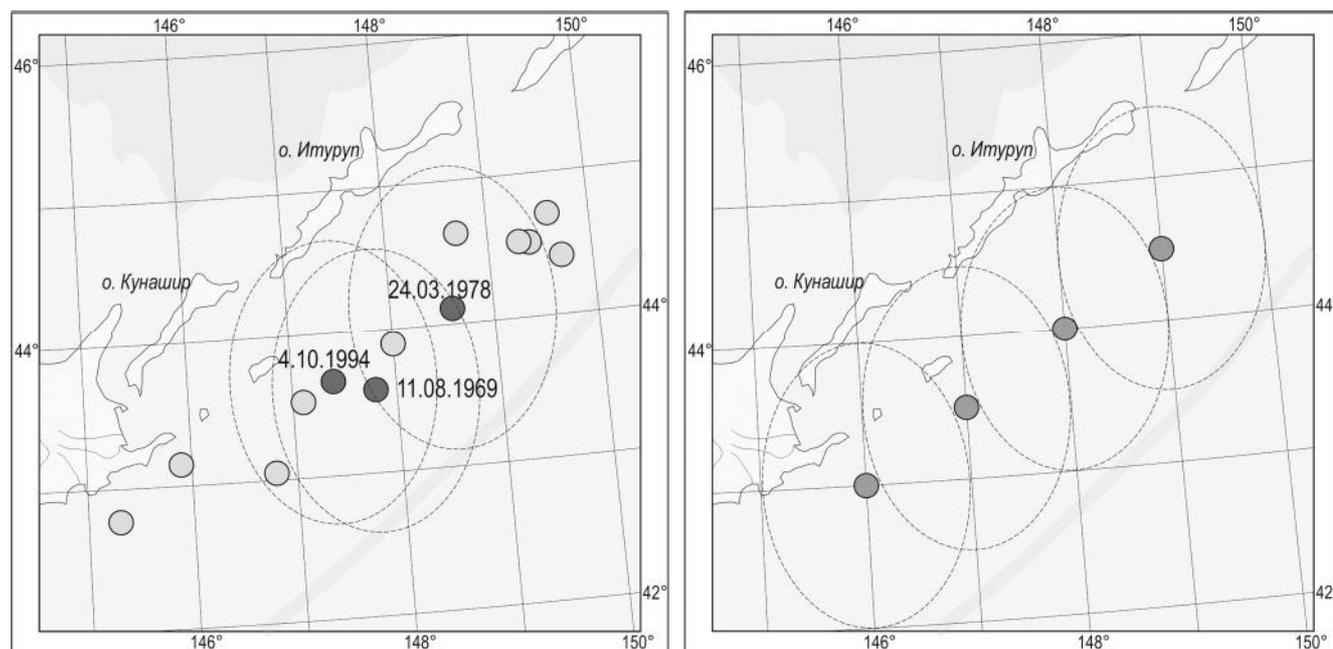
В выражении (4)  $E_i$  обозначает сейсмическую энергию события с номером  $i$ . Знак «+» означает события, произошедшие в период прироста нагрузки, а знак «-» – события при разгрузке. Показатель степени  $m$  принимает значения  $m = 1, 1/2, 0$ . При  $m = 1$  параметр  $Y_1 = Y_E$  представляет собой отношение выделенной сейсмической энергии в периоды, соответственно, прироста и уменьшения напряжения вследствие приливов. При  $m = 1/2$  (в данной работе использовано это значение по аналогии с работами [37–40]) этот параметр описывает отношение откликов деформации Беньоффа на тех же фазах прилива,  $Y_{1/2} = Y_B$ . А при  $m = 0$  он сводится к отношению количества событий  $N^+, N^-$ , произошедших во время нагрузки и разгрузки, соответственно,  $Y_0 = Y_N = N^+/N^-$ . Положительными считаются приливные возмущения на той фазе прилива, когда увеличивается напряжение сдвига, действующее вдоль поверхности, по которой, в соответствии с законом Кулона-Мора, легче всего происходит проскальзывание [33]. Стоит отметить, что в работах А.В. Николаева [18] при построении отношения числа событий  $N^+/N^-$  в периоды прироста нагрузки и разгрузки эти периоды выбирались несколько иначе: по возмущениям вертикальной компоненты напряжения (добавка к литостатическому давлению соответствует положительной фазе).

Для расчетов по методу LURR применялся разработанный в ИМГиГ ДВО РАН программный комплекс Seis-ASZ [5]. Входными данными для комплекса служит каталог сейсмических событий, который содержит следующие характеристики по каждому событию: время, место и энергия события. Был вы-

бран унифицированный каталог Курило-Камчатских землетрясений по магнитуде  $m_b$ , включающий землетрясения с 1737 года [1], пополняемый авторами из бюллетеня ISC [34] и продолженный до середины марта 2020 г. В данной работе использован этот вариант базы как более единообразный для исследуемой территории. В подборку данных включены события Курильских островов, о-ва Хоккайдо, глубокофокусные события Охотского моря ( $\varphi = 40^\circ\text{N}–51^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 141^\circ\text{E}–155^\circ\text{E}$ ) и исключены мелкофокусные события о-ва Сахалин. В такой список входят 22782 землетрясения с магнитудой  $m_b \geq 3.0$  с глубиной очага  $0 \leq H \leq 700$  км. Но так как авторами был ограничен район исследования только Южными Курильскими островами, то для работы был создан рабочий каталог Южно-Курильского региона. Нижняя временная граница была сдвинута до 1964 г. (тогда увеличились регистрационные возможности сейсмической сети и количество событий в каталоге возросло почти в три раза). Зона для исследований ограничена прямоугольной областью с координатами  $\varphi = 42^\circ\text{N}–46^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 145^\circ\text{E}–150^\circ\text{E}$ . Составленный таким образом каталог обеспечивает хорошую статистику с 9755 событиями с магнитудой  $m_b \geq 3.0$  и с глубиной очага  $0 \leq H \leq 250$  км, что позволяет делать качественные ретроспективные исследования по методу LURR для мелкофокусных сильных землетрясений.

Если на Сахалине методика LURR была использована для прогноза землетрясений с  $M > 5$  (с 1997 по 2019 гг. на Сахалине таких всего 19), то на Курильских островах таких землетрясений значительно больше [1]. Для работы был выбран порог, при котором в каталоге остается меньшее количество землетрясений (как при расчетах на Сахалине), например с  $m_b \geq 6.5$  (рис. 1). В таблице показаны 13 таких землетрясений, которые попали в район исследования. На рис. 1 показаны сейсмические события из таблицы и расчетные области для построения распределений LURR в виде окружностей.

Для проведения ретроспективных исследований из каталога были выбраны два сильнейших Шикотанских землетрясения: 11.08.1969 г. ( $M = 8.2$ ,  $m_b = 6.5$ ) и 04.10.1994 г. ( $M = 7.9$ ,  $m_b = 7.2$ ). В дополнение к ним из двух событий 17.06.1973 г. и 24.03.1978 г. (табл.) мы выбрали второе по следующим соображениям: оно интересно для нас тем, что является сильнейшим из роя Итурупских землетрясений 22–24 марта 1978 г. [1]. Кроме того, землетрясение 1973 года располагается у о. Хоккайдо на краю района исследования и в области низкой плотности землетрясений. По этой причине для него расчетная зона (с центром в его эпицентре) не может быть построена.



**Рис. 1.** Распределение эпицентров землетрясений с  $m_b \geq 6.5$  (слева) и расчетные области для построения распределений LURR, выделенные окружностями (справа), в исследуемой области за период 1964–2020 гг.

Даты указаны для землетрясений, по которым проведен ретроспективный прогноз.

**Таблица. Землетрясения в исследуемой области.**

№	Год	месяц	день	час	мин.	сек.	широта, град	долгота, град	глубина, км	магнитуда, $m_b$
1	1964	7	5	23	35	59.6	44.71	149.6	43	6.6
2	1964	10	16	6	59	39.4	44.41	149.7	40	6.8
3	1964	10	16	8	18	29.5	44.52	149.4	50	6.5
4	1969	8	11	21	27	35.6	43.58	147.8	40	6.5
5	1973	6	17	3	55	2.2	43.15	145.9	55	6.5
6	1978	3	24	19	47	54.3	44.11	148.6	62	6.4
7	1981	9	3	5	35	41.6	43.53	147.1	21	6.6
8	1994	10	4	13	22	57.7	43.66	147.4	26	7.2
9	1994	10	9	7	55	34.6	43.89	148.0	0	6.5
10	1995	12	3	18	1	10.2	44.53	149.3	46	6.5
11	2000	1	28	14	21	5.8	43.05	146.8	46	6.6
12	2004	12	6	14	15	10.2	42.77	145.3	36	6.5
13	2014	7	20	18	32	48.35	44.63	148.7	72.2	6.6

В таблице события № 1, 2, 3 – это события, которые произошли в 1964 году и не будут учтены, так как по времени приходятся на начало выборки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Сейсмичность на Курильских островах заметно выше, чем на Сахалине и потому вручную весьма проблематично произвести сканирование всей области перемещением зоны расчета подобно тому, что было реализовано для Сахалина. Даже смещение на десятые доли градуса даёт значительное изменение в составе расчетной выборки, и поэтому для пилотной

работы подходы к выбору расчётных зон будут иными. Выбор параметров обработки осуществляется в области (она же станет расчетной), где 4.10.1994 г. произошло сильное Шикотанское землетрясение. Радиус круговой области в один градус является характерным для расчетов LURR и изменяться не будет. Для определения порога отсека аномалий (уровень дискриминации) предлагается значение параметра LURR равным трем при теоретическом фоновом значении 1. При исследовании сейсмичности на Сахалине окна сглаживания размером менее одного года давали большое количество ложных тревог (аномалии).

лий параметра LURR, вызванных малым количеством землетрясений в отдельных окнах), и все результаты получены на окне, равном 360 дням. В данной работе были проведены расчеты на разных окнах сглаживания: 60, 90, 120, 150, 180, 240 и 360 дней. Длина каталога в 10 лет оптимальна для расчетов. Диапазон рабочих магнитуд для этих расчетов был выбран на основании сахалинского опыта, то есть в расчёте участвовали только землетрясения с  $3.0 \leq mb \leq 5.0$ .

На рис. 2 представлены результаты расчетов для всех окон сглаживания, точки на графиках соответствуют середине окна. На рис. 2, *а–ж* видно, что за несколько месяцев до Шикотанского землетрясения (вертикальная стрелка на графике) появляется аномалия параметра LURR. Однако большое количество землетрясений в расчетной области приводит к тому, что на большом окне в 360 дней (рис. 2, *ж*) любые вариации находятся в пределах фонового уровня (ниже принятого порога дискриминации, равного трем). При окне 240 дней (рис. 2, *е*) происходит повышение уровня аномалии, при этом остальные вариации находятся ниже порога дискриминации. В окнах 180 и 150 дней (рис. 2, *д, з*) аномалия, относящаяся к землетрясению 4.10.1994 г., продолжила усиливаться, при сохранении уровня других вариаций ниже порога. Дальнейшее снижение окна от 120 дней (рис. 2, *в*) до 90 (рис. 2, *б*) и ниже – до 60 дней (рис. 2, *а*) приводит к появлению многочисленных аномалий, которые превышают порог дискриминации. Для минимизации риска появления ложных тревог необходимо было выбрать окно с максимальным уровнем подавления всех аномалий, кроме главной. Мы выбрали окно, равное 180 дням. На рис. 2, *з* показана масштабированная копия (для детализации временной шкалы) главной аномалии рис. 2, *д*, которая является предвестником Шикотанского землетрясения.

На Южных Курильских островах землетрясений с магнитудами от 4-х до 5-ти происходит на порядок больше, чем на Сахалине, это значит и скачки аномалий должны быть в десятки раз сильнее. Принимая значение окна, равное 180 дням, предполагаем, что минимальный порог дискриминации признака может быть также выше трех, например, пять. В этом случае на рис. 2, *е* мы видим только одну аномалию. Анализируя график на рис. 2, *д*, мы обнаружили, что впервые превышение порога дискриминации (значение 5) отмечено 9.07.1994 г., а максимальное значение достигнуто 17.09.1994 г. Затем параметр LURR вернулся к фоновым значениям. Период тревоги составил не более 100 дней.

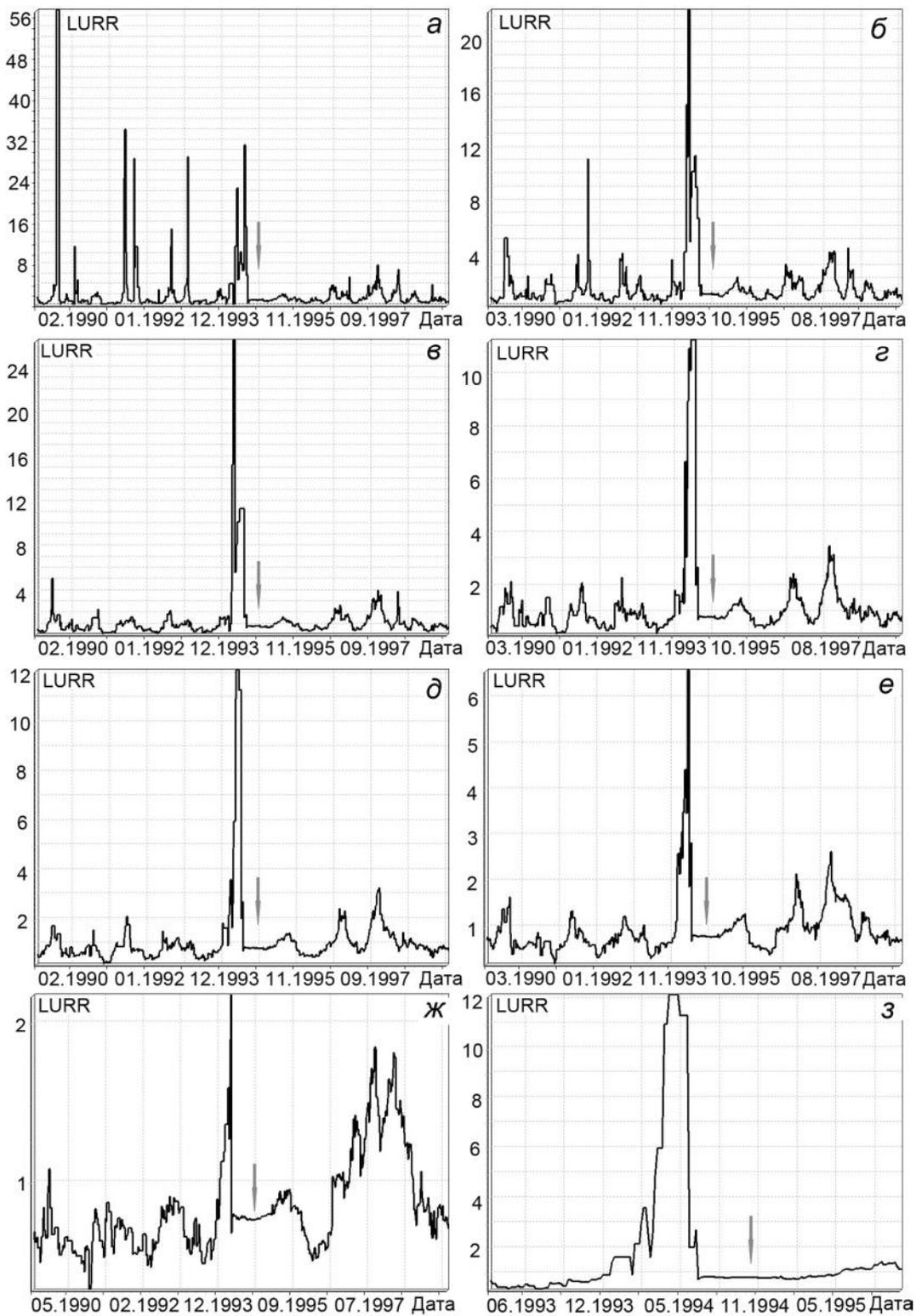
Для выявления пропущенных целей в расчетной области (а также поблизости от неё) мы прове-

рили наличие землетрясений с магнитудой, выше пороговой ( $mb = 6.5$ ). В табл. видно, что за период 1989–1999 гг. таких землетрясений (кроме вышеобозначенного события 4.10.1994 г.) не наблюдается, а 28.01.2000 г. произошло землетрясение с магнитудой 6.6 с эпицентром 43.05°N, 146.8°E. Это землетрясение находится в области расчёта, а аномалия в 1998 г. (рис. 2, *д*), находящаяся ниже порога дискриминации, является предвестником события 28.01.2000 г. Однако понижение уровня дискриминации или окна сглаживания существенно увеличивает количество аномалий, поэтому рассматриваем аномалии выше порога дискриминации, равного 5.

Следующий параметр, который нужно проверить на расчетной выборке – диапазон магнитуд для землетрясений, включаемых в расчёт. Было сделано несколько выборок событий с разным магнитудными диапазонами. Полная выборка в зоне расчёта за период 1989–1999 гг. насчитывает 1643 события, а выборка с  $3.0 \leq mb \leq 5.0$  (уже рассчитанный нами диапазон) включает в себя 1483 землетрясения. Тестовые расчёты проведены для следующих магнитудных диапазонов:  $3.0 \leq mb \leq 6.0$ ;  $4.0 \leq mb \leq 6.0$ ;  $4.0 \leq mb \leq 7.5$  и  $5.0 \leq mb \leq 7.5$ , при этом сохранено окно сглаживания, равное 180 дням. Количественно в выборках для вышеуказанных магнитудных диапазонов оказалось 1631 (почти полная выборка), 1102, 1115 и 160 событий, соответственно. Полученные результаты (рис. 3) свидетельствуют о том, что, несмотря на сохранение основной аномалии (первая аномалия слева от стрелки) землетрясения 4.10.1994 г., появляются многочисленные ложные тревоги (рис. 3, *з*) (при отсутствии других землетрясений с  $mb \geq 6.5$ ). На рис. 3, *а–в* аномалия землетрясения 4.10.1994 г. не выходит за установленный порог дискриминации, равный пяти. Считаем, что у выше перечисленных диапазонов магнитуд преимуществ нет по сравнению с диапазоном  $3.0 \leq mb \leq 5.0$ .

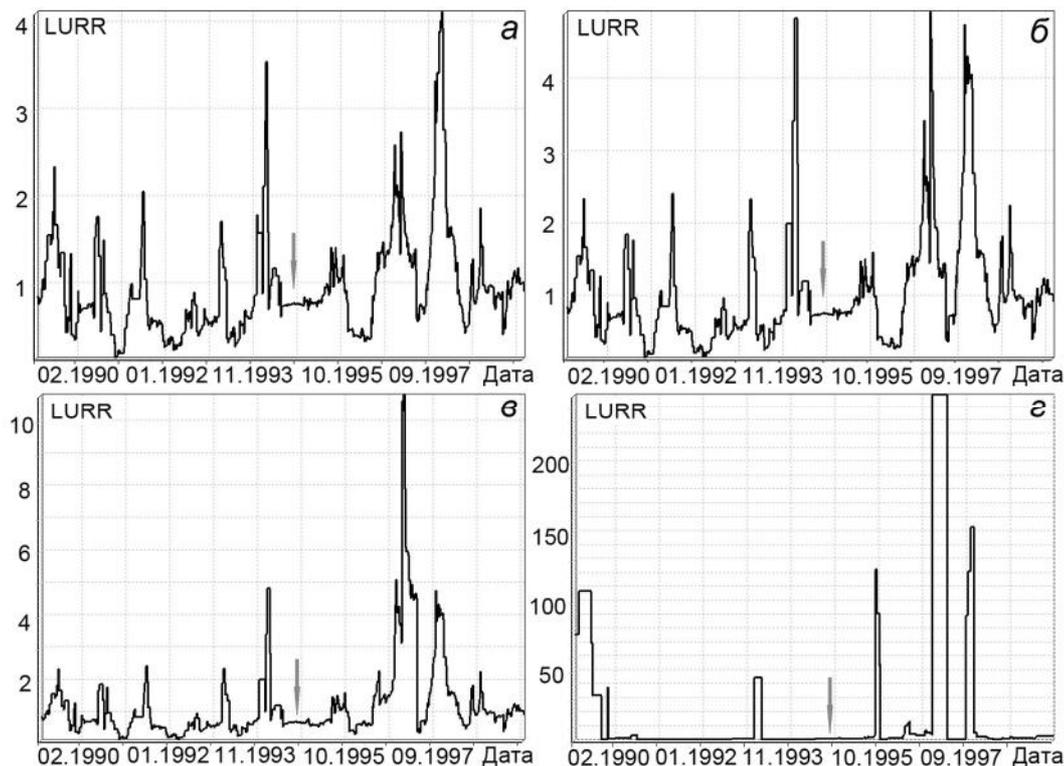
После выбора магнитудных параметров и окна сглаживания перейдем к анализу расчетной зоны за весь период (1964–2020 гг.), этот шаг может дать объективную оценку эффективности метода. Рассмотрим все аномалии, которые попадали в расчетную зону или находились поблизости от неё (не более 2 градусов от центра зоны). На рис. 4 приводится график изменения параметра LURR. Видно, что с 1984 г. параметр LURR только один раз превысил порог, и это было в 1994 г. (перед Шикотанским землетрясением), а до 1984 г. было пять аномалий (14.01.1966 г.; 20.08.1972 г.; 29.07.1977 г.; 18.09.1979 г.; 28.04.1982 г.).

Анализ таблицы показывает, что с 1984 г. в расчетной области пропущенных землетрясений не от-

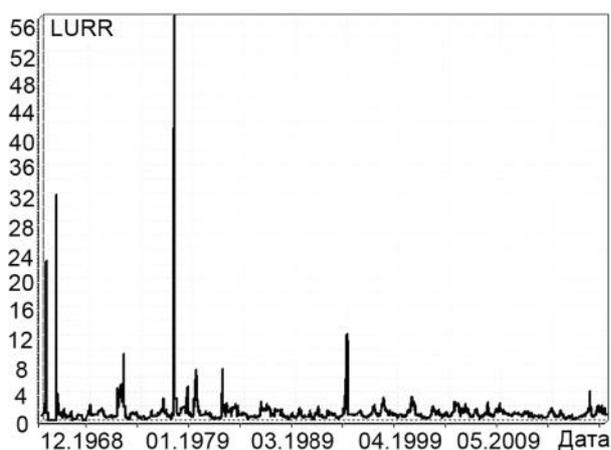


**Рис. 2.** Изменение параметра LURR в расчетной области с координатами 43.6°N, 147.6°E за период 1989–1999 гг. (на графике рис. 2, з масштабированный фрагмент графика рис. 2, д за период 1993–1995 гг.).

Окно сглаживания в расчете для графика: а – 60 дней, б – 90 дней, в – 120 дней, г – 150 дней, д – 180 дней, е – 240 дней, ж – 360 дней. Землетрясение 4.10.1994 г. отмечено стрелкой.



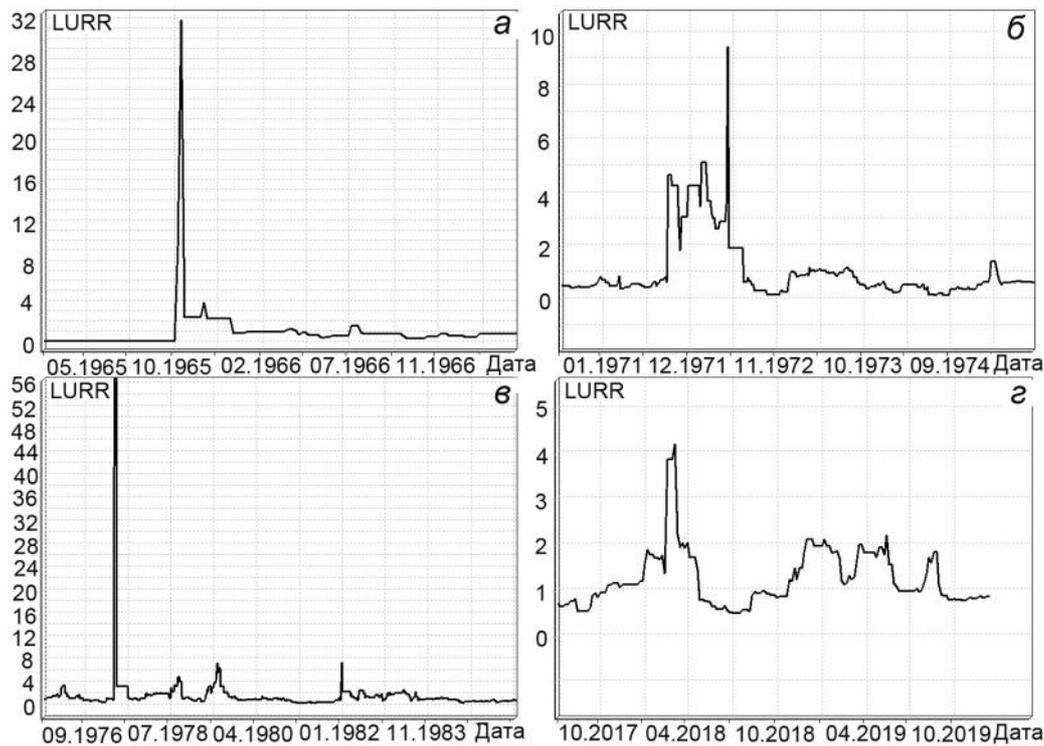
**Рис. 3.** Изменение параметра LURR в расчетной области с координатами 43.6°N, 147.6°E за период 1989–1999 гг. Диапазон рабочих магнитуд в расчете для графика 3.0 ≤ mb ≤ 6.0 (а), 4.0 ≤ mb ≤ 6.0 (б), 4.0 ≤ mb ≤ 7.5 (в), 5.0 ≤ mb ≤ 7.5 (г). Землетрясение 4.10.1994 г. отмечено стрелкой.



**Рис. 4.** Изменение параметра LURR в расчетной области с координатами 43.6°N, 147.6°E за период с 1964–2020 гг.

мечено, то есть, зафиксирована область тревоги, в которой произошло одно единственное землетрясение (04.10.1994 г. с  $M = 7.9$ ,  $m_b = 7.2$ ). Для рассмотрения изменения параметра LURR за промежуток 1964–2020 гг. разобьем его на четыре части: 1964–1968 гг., 1970–1975 гг., 1975–1984 гг., 2017–2020 гг. Самая первая аномалия появляется в 1964 г. (рис. 4) на «краю»

выборки и нами не рассматривается, т.к. предыстории в нашем каталоге нет. На рис. 5, а–г представлен график изменения параметра LURR за вышеуказанные периоды времени. На рис. 5, а показана сильная, но короткая по времени аномалия в январе 1966 г. Следующая за ней продолжительная аномалия начинается в январе 1971 г. и заканчивается в августе 1972 г. (рис. 5, б). Для этих временных периодов в табл. есть только два землетрясения: 11.08.1969 г. и 17.06.1973 г. Землетрясение 17.06.1973 г. находится очень близко к расчётной области – около 20 км. Считаем, что обе аномалии являются прогнозными признаками, хотя и с неожиданно большим периодом тревоги для первого события – три года и семь месяцев. На рис. 5, в видно, что появляются три аномалии: в августе 1977 г. (на порядок больше остальных), в сентябре 1979 г., в апреле 1982 г., из них последние две – слабые (превышают незначительно или на грани порога) и короткие по времени. В исследуемом районе в этот период произошло сильное землетрясение 24.03.1978 г., а аномалия 1977 г., вероятно, является его предвестником. Следует отметить, что с 22 по 24 марта 1978 г. произошло несколько сильных землетрясений, сильнейшим в этой серии было землетрясение 24 марта с  $M =$



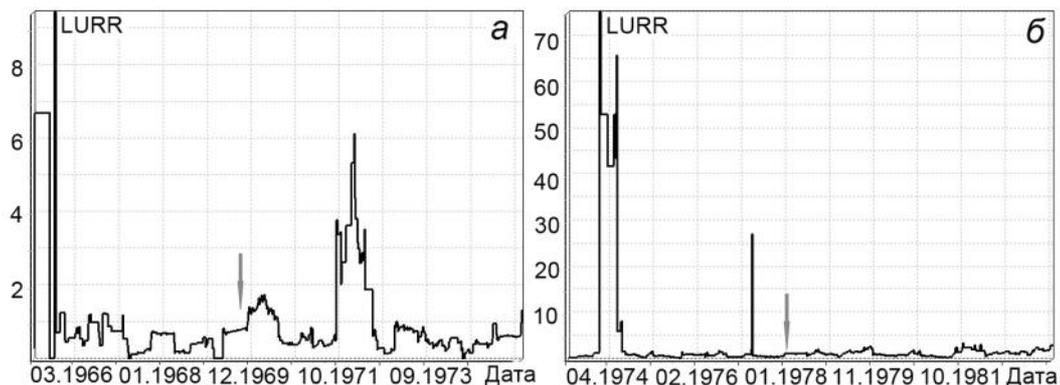
**Рис. 5.** Изменение параметра LURR в расчетной области с координатами 43.6°N, 147.6°E за периоды: 1964–1968 гг. (а), 1970–1975 гг. (б), 1975–1984 гг. (в), 2017–2020 гг. (г).

7.7,  $m_b = 6.4$ . [1, 19]. Аномалия в сентябре 1979 г. появилась за два года до землетрясения 3.09.1981 г.  $M = 6.7$ ,  $m_b = 6.6$  (табл.) и является его предвестником. Аномалия 1982 г. является ложной тревогой. На последнем графике (рис. 5, г) показано изменение параметра LURR за период 2017–2020 гг. Любая аномалия в данный период идёт с прогнозом вперёд, но таких аномалий не обнаружено. Таким образом, предполагаем, что землетрясение с  $m_b \geq 6.5$  в этом районе в ближайшие несколько лет можно не ожидать. Общий итог расчетов предвестниковых аномалий в расчётной области за 56 лет следующий: пять успешных прогнозов (для землетрясений 11.08.1969 г., 17.06.1973 г., 24.03.1978 г., 3.09.1981 г., 4.10.1994 г.), одна ложная тревога (аномалия 28.04.1982 г.) и одна пропущенная цель (землетрясение 28.01.2000 г.).

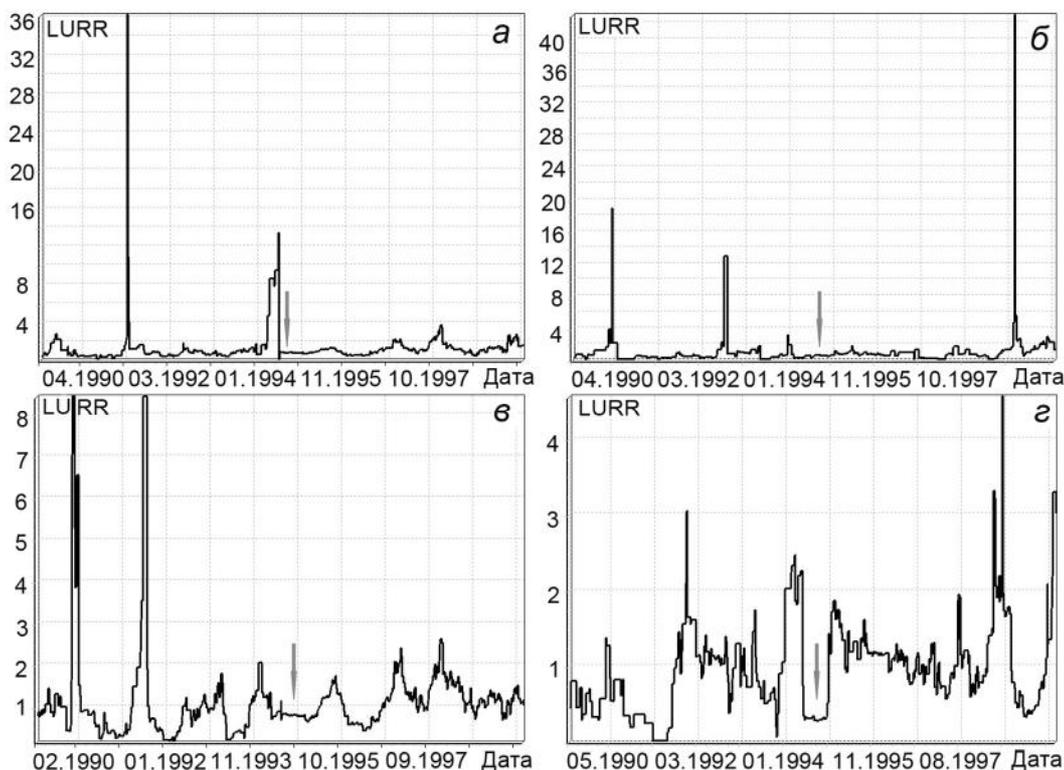
Далее рассмотрим две области с эпицентрами двух других сильнейших землетрясений 11.08.1969 г. и 24.03.1978 г. Эти области незначительно смещены относительно расчётной области Шикотанского землетрясения 4.10.1994 г. и содержат в себе все три перечисленных землетрясения. На рис. 6 показаны расчеты по ним. В обоих расчетах так же выбраны 10-летние интервалы, для первой выборки расчетных землетрясений с магнитудным диапазоном  $3.0 \leq m_b \leq 5.0$  набралось 712 (для зоны Шикотанского события было

1483), а для второй – всего 549. На рис. 6, а появились две аномалии: первая наблюдается за период с августа 1965 по январь 1966 г. и вторая – за период 1971–1972 гг. Обе аномалии наблюдались в зоне Шикотанского землетрясения, так как эпицентры рассматриваемых землетрясений почти рядом (рис. 1). Мы считаем, что эти аномалии являются предвестниками сильных землетрясений 11.08.1969 и 24.03.1973 годов (табл.) с периодом ожидания 3 года 8 мес. и 8 мес., соответственно. На рис. 6, б за период 1973–1983 гг. отметим две аномалии: с апреля по сентябрь 1974 г. и в июле 1977 г. Если бы не вторая аномалия, которая в зоне расчета Шикотанского землетрясения (рис. 5, в) также отражена (август 1977 г.) и является самой крупной для той области, то первую аномалию можно было бы определить как прогноз для землетрясения 24.03.1978 г. с задержкой в три года и шесть месяцев, поэтому можно связать обе аномалии с одним событием 24.03.1978 г. Следовательно, получен составной прогнозный признак с дальним и ближним предвестниками. В противном случае, первая аномалия может быть признана ложной тревогой. Для обеих зон пропущенных землетрясений не отмечено.

Следующим этапом стало определение устойчивости аномалий параметра LURR при смещении расчетной области. Проведем расчет для выявления



**Рис. 6.** Изменение параметра LURR в расчетной области с координатами в эпицентре землетрясений: 11.08.1969 г., 43.58°N., 147.82°E за период 1964–1974 гг. (а), 24.03.1978 г., 43.9°N, 149.1°E за период 1973–1983 гг. (б). Землетрясения отмечены стрелками.



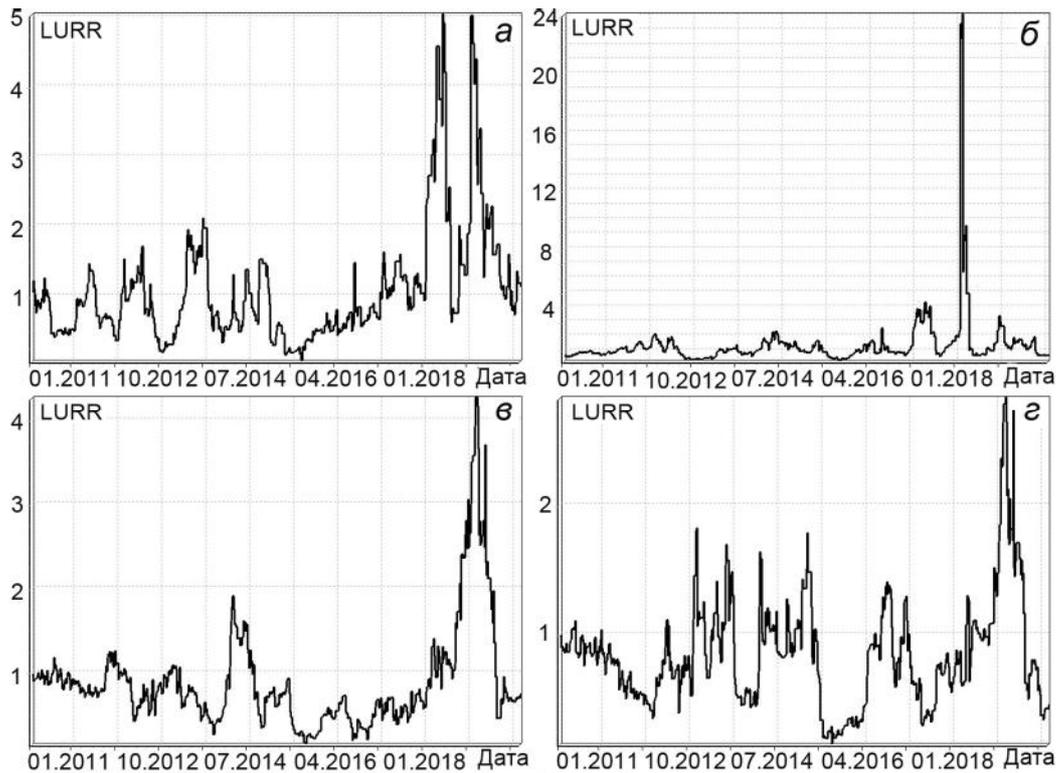
**Рис. 7.** Изменение параметра LURR в расчетных областях за период 1989–1999 гг. с координатами: 43°N, 148°E (а); 44°N, 146°E (б); 44°N, 148°E (в); 45°N, 150°E (з).

На всех графиках землетрясение 4.10.1994 г. отмечено стрелкой.

аномалии землетрясения 4.10.1994 г. Для этого рассмотрим ещё четыре зоны, три из которых окружают расчетную зону, а одна на большом удалении от неё (рис. 1, справа). Результаты расчетов за период 1989–1999 гг. показаны на рис. 7. На графике изменения параметра LURR (рис. 7, а) признак сохраняется, но появляется ещё один в июле 1991 года. На рис. 7, б нами выделены три аномалии – в июле 1990 г., декабре 1992 г. и январе 1999 г., на рис. 7, в – две анома-

лии – в апреле 1990 г. и октябре 1991 г. На последнем графике (удаленная зона) изменения параметра LURR (рис. 7, з) аномалий не обнаружено.

Из графиков видно, что устойчивость аномалии перед землетрясением 4.10.1994 г. в других областях слабая, но только во времени появления аномалии. Кроме того, например, удаляясь от эпицентра Шикотанского землетрясения на юг и запад (рис. 7, а и 7, б) мы шире захватываем другие сильные землетря-



**Рис. 8.** Изменение параметра LURR в расчетных областях за период 2010–2020 гг. с координатами: 43°N., 146°E (а); 43.5°N., 147°E (б); 44°N., 148°E (в); 44.5°N., 149°E (г).

сения (в том числе и за пределами области исследования), например, землетрясение 15.01.1993 г. (42.95°N, 144.2°E,  $M = 7.4$ ,  $m_b = 6.8$ ) и 28.01.2000 г. (43.05°N, 146.8°E,  $M = 6.6$ ,  $m_b = 6.6$ ). В результате изменения положения расчетных областей, аномалии 1991–1993 гг. (рис. 7) могут иметь отношение как к землетрясению 15.01.1993 г., так и к Шикотанскому событию 4.10.1994 г. Вероятно, и аномалия 1999 г. на рис. 7, б может быть признаком землетрясения 28.01.2000 г. С позиций прогноза землетрясений с  $m_b \geq 6.5$  в первой зоне (рис. 7, а) появилась 1 ложная тревога, во второй (рис. 7, б) – две, в третьей (рис. 7, в) – одна (причем три из них в 1990 г., т.е. она одна). Во всех трёх ближних областях прогноз землетрясения 4.10.1994 г. состоялся, а в удаленной области ожидаемо признак отсутствует. Периоды тревоги составили от 100 дней (рис. 7, а) до трёх лет (рис. 7, в). Из четырех зон в двух зафиксирована аномалия параметра LURR.

В заключение работы проведём расчеты изменения параметра LURR за период 2010–2020 гг. в четырех зонах (рис. 1, справа), которые расположим вдоль островов (попытки сделать прогноз будущего землетрясения), результаты представлены на рис. 8. Как видно на рис. 8, а, б, нами зафиксирована аномалия в июне 2018 г. На рис. 8, б эта аномалия проявляется ярче, с пятикратным превышением принятого уровня

дискриминации, следовательно, в зоне с координатами 43.5°N, 147°E (рис. 8, б) можно сделать прогноз на будущее землетрясение. Аномалия на рис. 8, б (по времени) – это усиленный аналог небольшого всплеска признака на рис. 5, г (зона эпицентра Шикотанского землетрясения). Как отмечено ранее, смещение расчетной зоны влияет на значения аномалий параметра LURR, но если они велики, то в соседних зонах ослабление не будет значить исключение их проявления, и их можно будет всегда найти по отношению к фоновому значению. С учётом достаточно больших периодов тревоги, которые ранее были зафиксированы, мы можем лишь предположить, когда прогноз может реализоваться – например, в течение трёх с половиной лет, то есть до 2022 г. Область прогноза – это круговая область с радиусом в один градус и центром 43.5°N, 147°E.

#### ВЫВОДЫ

На примере Шикотанского землетрясения 4.10.1994 г. выбраны оптимальные параметры обработки (уровень дискриминации, порог скользящего окна, диапазон рабочих магнитуд) каталога землетрясений методом LURR для анализа выделенной зоны Южных Курильских островов. Эти параметры позволили ретроспективно получить предвестник в

эпицентральной области выбранного землетрясения за несколько месяцев до события. Дополнительно в данной зоне на большем периоде времени получены предвестники нескольких сильных землетрясений. Проверены зоны эпицентров двух других сильных землетрясений – 11.08.1969 г. и 24.03.1978 г., в них выделены предвестники, однако периоды тревоги оказались больше, чем в случае с Шикотанским землетрясением 4.10.1994 г. Устойчивость предвестников при изменении зоны расчета проявляется слабо по времени возникновения аномалии (варьируется от 100 дней до 3 лет). В целом, за 56-летний период наиболее яркие изменения параметра LURR, так или иначе, оказались связаны с несколькими сильными землетрясениями, что и показано в работе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН по теме №121022000085-9.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева М.Ю., Ким Ч.У. Землетрясения Курило-Камчатского региона (1737–2009 гг.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2012. 384 с.
2. Балакина Л.М. Шикотанское землетрясение 4 октября 1994 г. и Курило-Камчатская сейсмогенная зона // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г. Экстренный выпуск. М., 1994. С. 42–51.
3. Викулин А.В. О долгосрочном сейсмическом прогнозе С.А. Федотова // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. 35. С. 68–86.
4. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 256 с.
5. Закупин А.С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 34–43.
6. Закупин А.С., Семенова Е.П. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ( $M_w > 5$ ) на Сахалине методом LURR // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 5. С. 83–98.
7. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине ( $M_w = 5.8$ , 14 августа 2016 года) // Геология и геофизика. 2018. № 11. С. 1904–1911.
8. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине // Геофизические процессы и биосфера. 2020. № 19 (1). С. 66–78.
9. Кособоков В.Г., Шебалин П.Н., Тихонов И.Н., Хили Дж.Х., Дьюи Дж.У. Заблаговременный среднесрочный прогноз Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г. Экстренный выпуск. М., 1994. С. 71–73.
10. Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений и геодинамические процессы // Вычислительная сейсмология. Вып. 36. Ч. 1. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. М.: ГЕОС, 2005. 179 с.
11. Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли. 2020. № 1. С. 43–52.
12. Кочарян Г.Г., Батухтин И.В. Лабораторные исследования процесса скольжения по разлому как физическая основа нового подхода к краткосрочному прогнозу землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 671–691.
13. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 3. С. 19–35.
14. Тихонов И.Н., Мальшев А.И. Модель сейсмического процесса для целей средне- и краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений в районе Южных Курильских островов // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений Северо-Запада Тихого океана. В 2-х т. / Отв. ред. А.И. Иващенко. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. Т. 1. С. 34–47.
15. Мальшев А.И., Тихонов И.Н. Опыт разработки элементов методики краткосрочного прогноза сильных землетрясений по потоку слабых сейсмических событий // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Очаги сильных землетрясений Дальнего Востока. В 8-ми т. / Гл. ред. К.Ф. Сергеев. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 1997. Т. V. С. 29–46.
16. Матвиенко Ю.Д. Применение метода М8 на Камчатке: успешный заблаговременный прогноз землетрясения 5 декабря 1997 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 27–36.
17. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
18. Николаев В.А. Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 103–114.
19. Новый каталог сильнейших землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 536 с.
20. Оскорбин Л.С., Бобков А.О. Макросейсмическое проявление землетрясений на территории южной части Дальнего Востока // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. В 8 т. / Гл. ред. К.Ф. Сергеев. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 1997. Т. VI. С. 45–74.
21. Сасорова Е.В., Андреева М.Ю., Левин Б.В. Динамика сейсмичности Курильской дуги на основе многомерного статистического анализа // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 75–84.
22. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
23. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С., Смирнов Б.В., Завьялов А.Д. Способ среднесрочного прогноза землетрясений // Докл. АН. 1996. Т. 347, № 3. С. 405–407.
24. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64–74.
25. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

26. Тараканов Р.З., Бобков А.О. Зоны возможных очагов землетрясений Курило-Охотского региона // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. В 8-ми т. / Гл. ред. К.Ф. Сергеев. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 1997. Т. VI. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 94–110.
27. Тихонов И.Н. Методика выявления периодичностей сильных землетрясений и прогноза интервалов времени с повышенной вероятностью их возникновения / Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2004. 33 с.
28. Тихонов И.Н. Обнаружение и картирование сейсмических затихий перед сильными землетрясениями Японии // Вулканоология и сейсмология. 2005. № 5. С. 1–17.
29. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. М.: Наука, 1965. № 36 (203). С. 66–93.
30. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 63–99.
31. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
32. Шебалин П.Н. Увеличение радиуса корреляции и цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями // Физика Земли. 2020. № 1. С. 30–42.
33. Harris R.A. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implication for seismic hazard // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 24347–24358.
34. International Seismological Centre. <http://www.isc.ac.uk/> (дата обращения 20.03.2020 г.).
35. Lamaitre J. Formulation and identification of damage kinetic constitutive equations / Continuum damage mechanics (ed. D. Krajcinovic) // Wien: Springer-Verlag, 1987. P. 37–90.
36. Yangde F., Guoliang Ji, Cui Wenkai. Parallel computing for LURR of earthquake prediction // Intern. J. Geophys. 2012. Article ID 567293. 3 p.
37. Yin X., Yin C. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction // Sci. China. 1991. V. 34. P. 977–986.
38. Yin X.C., Yin C., Chen X.Z. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction - the load-unload response ratio theory // Nonlinear dynamics and predictability of geophysical phenomena. Book Series: Geophys. Monograph Series. 1994. V. 18. P. 55–60.
39. Yin X.C., Chen X.-Z., Song Z.-P., Yin C. A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory // Pure & Applied Geophysics. 1995. V. 145. P. 701–715.
40. 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: Load/Unload Response Ratio (LURR) theory // Pure & Applied Geophys. 2000. V. 157. P. 2365–2383.

*Рекомендована к печати В.Г. Быковым  
после доработки 19.11.2021 г.  
принята к печати 19.01.2022 г.*

*A.S. Zakupin, M.Yu. Andreeva*

### **Application of the LURR method to study seismicity of the Southern Kuril Islands**

An approach is proposed for the analysis of seismic sequences for the Southern Kuril Islands by the load/unload response ratio (LURR) method. Optimal parameters for carrying out calculations were chosen using a circular area, the center of which was the epicenter of the Shikotan earthquake of October 4, 1994. Calculations were carried out for two more earthquakes of August 11, 1969 and March 24, 1978, which were the strongest in the last century. In all cases, anomalies in the LURR parameter were found several years before the earthquakes. To test the stability of the anomalies, several zones were investigated near the epicenters of the tested events. The anomalies were demonstrated to be unstable, that is, they can appear at different times or disappear altogether. The forecast efficiency was tested on the epicentral region of the Shikotan earthquake for the period 1965–2020. During this period, six anomalies were recorded, five of which preceded earthquakes with a magnitude of  $m_b \geq 6.5$  that either occurred in immediate vicinity or were included in the calculated area, as well as one false alarm and a missed target.

**Key words:** seismicity, seismic events, LURR method, earthquake catalog, Kuril Islands.