

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮГА САХАЛИНА,
ПРЕДВАРЯЮЩИХ СИЛЬНЫЕ ТОЛЧКИ, С ЦЕЛЬЮ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА
ВРЕМЕНИ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

И.Н. Тихонов¹, В.И. Михайлов², А.И. Малышев³

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

²Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, ул. Тихоокеанская 2а, г. Южно-Сахалинск, 693010;
e-mail: mikhaylov@seismo.sakhalin.ru

³ФГБУН Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Почтовый пер. 7,
г. Екатеринбург, 620075; e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 4 апреля 2016 г.

Выполнено ретроспективное моделирование последовательностей слабых ($M \sim 2.0\text{--}3.0$) мелкофокусных землетрясений юга Сахалина за период 2003–2014 гг. по методу саморазвивающихся процессов на основе данных каталога локальной сети. Построены математические модели нелинейного нарастания кумулятивной суммы числа толчков перед сильными ($M = 4.6\text{--}6.2$) событиями. Получены краткосрочные прогнозные оценки параметра T_0 (времени возникновения сильных толчков) с высокой степенью точности. Показана устойчивость получаемых решений при варьировании длительности интервала обработки данных каталога. Постепенное снижение ошибки прогноза значения параметра T_0 достигается по мере приближения конца интервала обработки к моменту главного толчка. Хотя в ретроспективном варианте расчетов ошибки прогнозов не превышают первых суток, оценки реальной точности могут быть получены только в ходе практики реальных прогнозов. Пока же в данной работе показана лишь принципиальная возможность краткосрочного прогнозирования сильных мелкофокусных землетрясений юга Сахалина.

Ключевые слова: коровая сейсмичность, каталог землетрясений, последовательность толчков, математическое моделирование, основной толчок, прогноз времени в очаге, Южный Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая активность Сахалинского региона характеризуется умеренным уровнем по сравнению с Курильской сейсмоактивной зоной. В течение 10 лет здесь регистрируется в среднем одно землетрясение с $M \geq 6$ и около 10 событий с $M \geq 5$. Землетрясения Сахалина сосредоточены по глубине в двух слоях: земной коре (на глубинах до 30 км) и мантии ($h = 250 \div 650$ км). Глубокофокусные (мантийные) землетрясения, связанные с Курильской сейсмофокальной зоной, не представляют серьезной сейсмической опасности и в данной работе не рассматриваются.

Сильные ($M \sim 5.0$ и более) мелкофокусные землетрясения юга Сахалина (территории южнее 48° с.ш.) приурочены к трем основным системам глубинных разломов в земной коре: Ребун-Монеронской на юго-западном шельфе острова, Западно-Сахалинской

и Центрально-Сахалинской, а также их оперениям (рис. 1). Две последние системы ограничивают поднятие Западно-Сахалинских гор с запада и с востока. Наиболее сильным событием на юге Сахалина за исторический период является землетрясение 1971 г. с $M_s = 7.5$, произошедшее в пределах Ребун-Монеронской системы разломов. За период детальных инструментальных наблюдений с 2003 г., о которых пойдет речь в статье, на юге Сахалина произошло 19 землетрясений с $M \geq 4.6$, в том числе два наиболее сильных – Горнозаводское 17 августа 2006 г. ($M_w = 5.6$) [3] и Невельское 2 августа 2007 г. ($M_w = 6.2$) [4].

Редкая сеть сейсмических станций на Сахалине до 2003 г. не позволяла иметь детальный каталог землетрясений. Он не был полон даже для землетрясений с $M \geq 3.0$, поэтому вопрос о возможности краткосрочного прогнозирования сильных мелкофокусных земле-

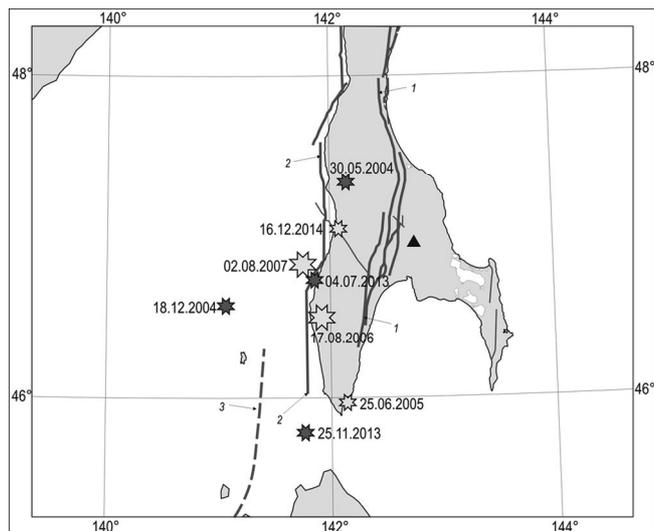


Рис. 1. Карта эпицентров сильных землетрясений, для которых выполнялся ретроспективный прогноз времени в очагах, и основные разломные зоны земной коры.

Звездочки – эпицентры землетрясений (светло-серые – глубина очага < 11 км, темно-серые – 11–15 км). Цифрами 1, 2, 3 обозначены, соответственно, Центральнo-Сахалинская, Западнo-Сахалинская и Ребун-Монеронская системы разломов.

трясений долгое время оставался открытым. Ситуация изменилась после 2003 г. в результате организации локальной сети автоматизированных сейсмических станций в южной части о-ва Сахалин. Конфигурация этой сети и типичный результат регистрации событий за год представлены на рис. 2. По данным сети, число регистрируемых землетрясений возросло более чем на порядок, и таким образом появилась возможность проведения краткосрочных прогнозных исследований на основе детального каталога землетрясений [1].

К сожалению, и в настоящее время мы можем проводить такие исследования только ретроспективно из-за отсутствия телеметрической системы сбора информации с отдельных пунктов наблюдений в реальном времени. С другой стороны, наличие детального каталога землетрясений было использовано нами для долгосрочного прогноза Невельского землетрясения 2007 г. ($M_w = 6.2$) [13–15]. Основными предвестниками в данном прогнозе явились сейсмические затишья первого и второго рода. Ниже показано, что если бы мы имели в то время данные детального каталога землетрясений в режиме, близком к режиму реального времени, то краткосрочный прогноз Невельского землетрясения 2007 г. был бы реализован.

Цель данной статьи – показать принципиальную возможность краткосрочного прогнозирования времени возникновения сильных мелкофокусных землетрясений с помощью метода саморазвивающихся

процессов (СРП) [4–6] на основе наиболее полных данных о мелкофокусной ($h < 30$ км) сейсмичности Южного Сахалина за период 2003–2014 гг.

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работах [5–8] А.И. Малышевым было рассмотрено развитие во времени различных физических процессов, названных саморазвивающимися процессами (СРП). Позднее была исследована проблема выбора адекватной математической модели эмпирических последовательностей землетрясений. Анализ данных каталогов землетрясений в различных регионах мира показал, что для их описания пригодно следующее нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка [9, 10]:

$$d^2x/dt^2 = k |(dx/dt)^\lambda - (dx/dt)_0^{\lambda/\alpha}|, \quad (1)$$

где параметр x — любая неубывающая количественная характеристика, естественным образом отражающая развитие процесса; k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность развития процесса, соответственно, в окрестностях стационарного состояния ($(dx/dt) \approx (dx/dt)_0$) и на значительном от него удалении ($(dx/dt) \gg (dx/dt)_0$).

Для исследований динамики значительных отклонений процесса от стационарного состояния уравнение СРП упрощается до вида

$$d^2x/dt^2 = k |(dx/dt)^\alpha. \quad (2)$$

Это уравнение характеризует лавинообразность нарастания сейсмической активности в моменты времени, непосредственно предшествующие времени возникновения сильного землетрясения, а также снижения их активности при возвращении в состояние покоя.

Для уравнения (2) поиск закономерностей в развитии природных процессов оказывается более простой задачей. В отличие от уравнения (1), решения которого в общем случае не представимы в явном виде и требуют численного интегрирования, уравнение (2) легко решается аналитически. Более того, решения уравнения (2) имеют квазилинейную форму: они представляют собой либо собственно линейную зависимость, либо сводятся к линейным зависимостям при логарифмировании. В задаче прогноза сильных землетрясений наибольший интерес представляют параметры T_a и X_a , – вертикальная и горизонтальная асимптоты решений уравнения (2), соответственно. Об этом подробнее будет сказано ниже.

В качестве параметра x может использоваться либо кумулятивная сумма числа сейсмических событий N , либо аналогичная сумма для условной высвобожденной деформации D или энергии E . Зависимости «параметр сейсмического процесса – время» бывают

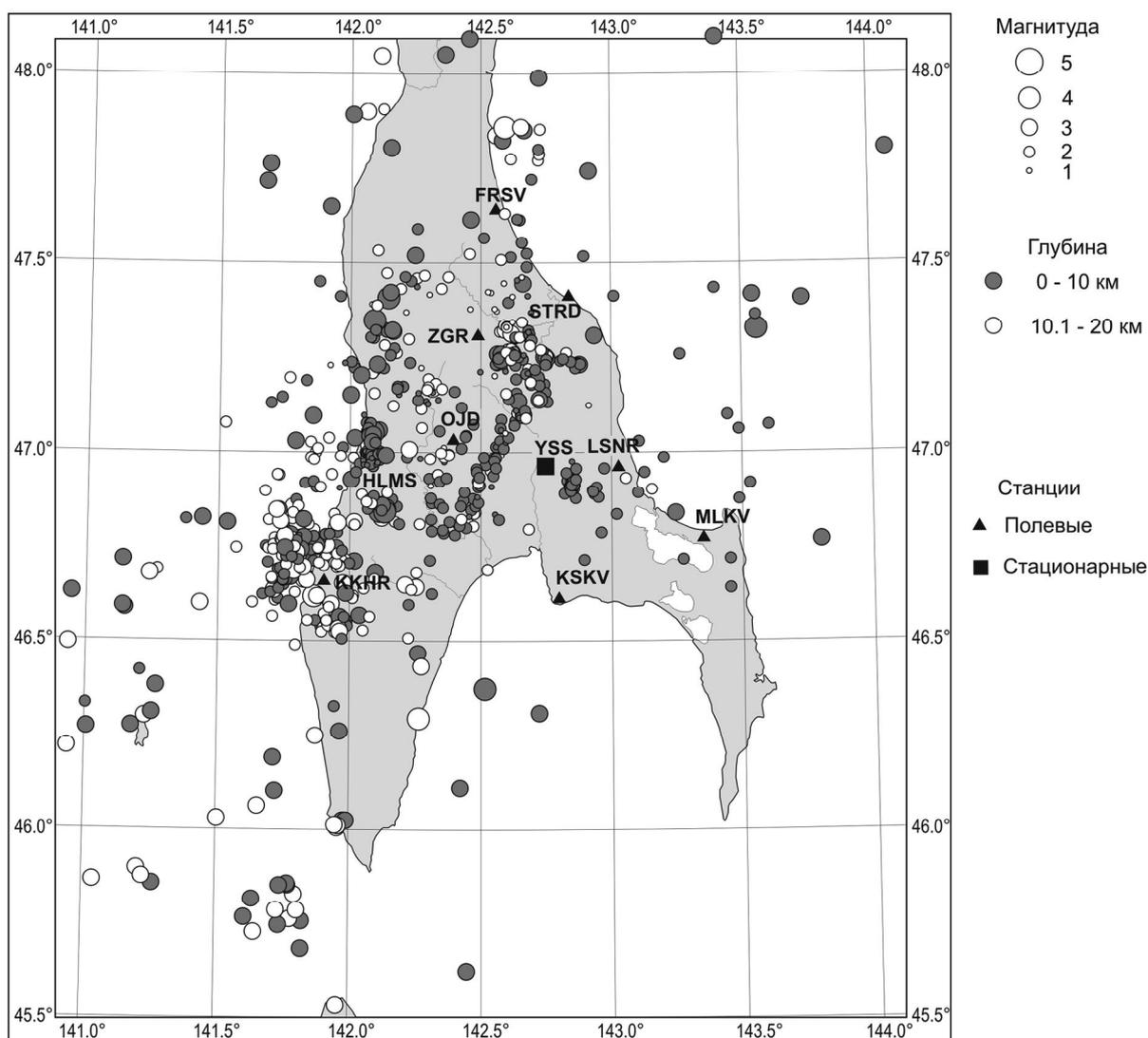


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений в южной части Сахалинского региона за 2014 г. и конфигурация локальной сети сейсмических станции Сахалинского филиала ГС РАН.

Коды и наименования станций: ZGR – Zagorskoe, KKHR – Kolhoznoe, KSKV – Korsakov, LSNR – Lesnoe, MLKV – Malkovo, OJD – Ojidaevo, STRD – Starodubskoe, FRSV – Firsovo, HLMS – Kholmsk, YSS – Yuzhno-Sakhalinsk.

трех типов: стационарные, активизации и затухания. Для построения аппроксимационных зависимостей на основе решений уравнения (2) в данной работе используется новая версия методики моделирования. Она обладает повышенной устойчивостью получаемых оценок. Такой устойчивости удалось достичь в результате многолетних поисков критерия оптимизации, адекватного сейсмическому процессу. В данной версии алгоритма в качестве критерия выбора лучшей аппроксимационной зависимости используется нестандартная характеристика – коэффициент упорядоченности K_{yn} , рассчитываемый по формуле следующего вида:

$$K_{yn} = [n \times (x_n - x_1) \times (t_n - t_1) / \sum(\Delta x_i \times \Delta t_i)]^{0.5}, \quad (3)$$

где n – число точек на аппроксимируемом участке фактических данных, $(x_n - x_1)$ и $(t_n - t_1)$ – диапазоны изменения фактических данных на этом участке по параметру x и времени t , соответственно, (выполняют функции нормирования обеих координат на диапазон изменений от 0 до 1), Δx_i и Δt_i – отклонения каждой точки фактических данных от расчетной кривой по оси абсцисс и по оси ординат, соответственно.

Процедура поиска оптимальной аппроксимации описана в работе [9]. Кратко суть ее можно описать следующим образом. Аппроксимируемый участок фактических данных анализируется для всех возможных вариантов сочетания асимптот по времени и по

параметру. Например, асимптота по времени может быть меньше минимального значения времени на аппроксимируемом участке, может отсутствовать и может быть больше максимального значения времени на аппроксимируемом участке. Три аналогичных варианта имеются и для асимптоты по параметру. Таким образом, возможны 9 вариантов сочетания положения обеих T_a и X_a (по времени и по параметру) асимптот. Для каждого из этих вариантов оптимизация выполняется независимо, а затем выбирается вариант с наибольшим значением коэффициента упорядоченности. Для тех вариантов, в которых определены асимптоты и по времени, и по параметру, оптимизация выполняется методом рекуррентных сечений [7, 9] с перебором возможных значений асимптот.

В ходе оптимизационного поиска расчет коэффициента упорядоченности в каждом пробном его определении осуществляется следующим образом. После пересчета фактических данных в координаты, для которых предполагается «квазилинейная» форма расчетной зависимости, параметры A и B этой зависимости определяются при помощи стандартной линейной аппроксимации. Затем по этим параметрам с учетом заданного сочетания значений асимптот определяются параметры уравнения (2) и начальные условия для его частного решения, что позволяет получить расчетную зависимость этого решения. И, наконец, уже эта зависимость используется для получения в реальных координатах расчетных значений по параметру и времени и используемых при расчете $K_{уп}$ отклонений Δx_i и Δt_i .

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И НАСТРОЙКА АЛГОРИТМА

В настоящее время для юга Сахалина существуют три каталога мелкофокусных землетрясений. Они характеризуются разной степенью детальности и охватывают различные периоды наблюдений. Данные за наиболее длительный период (1905–2005 гг.) наблюдений содержит региональный каталог землетрясений [11]. Он является уточненной версией каталога землетрясений с $M \geq 3.0$, публикуемого Сахалинским филиалом Геофизической службы Российской академии наук. Начиная с середины 1980-х годов, этот каталог уже достаточно хорошо отражает сейсмичность с уровня магнитуд $M \geq 3.0$. Тем не менее, нельзя утверждать, что полнота каталога отвечает этому уровню даже с начала 2000-х годов. Реальное состояние сейсмичности удалось оценить только после развертывания локальных сетей цифровых сейсмических станций на юге и севере Сахалина.

Более детальным (представительность с магнитуды $M \geq 2.6$) является авторский каталог Н.В. Краевой по данным цифровой системы IRIS-2 за 1992–2002 гг. [2]. Однако период наблюдений для этого каталога

невелик, да и события ограничены областью радиуса $R = 70$ км вокруг сейсмической станции «Южно-Сахалинск», на которой была установлена система IRIS-2. Именно этот каталог был использован нами [12] при первой попытке решить задачу, поставленную в данной статье. Однако получить устойчивые решения тогда не удалось, в основном, по двум причинам. Первая, главная, причина – недостаточная детальность каталога. При сдвиге обрабатываемой выборки событий на одно-два события иногда происходило резкое изменение параметров модели, что приводило к неустойчивости положения вертикальной асимптоты аппроксимационной зависимости $N = f(t)$. Второй причиной неустойчивости решений могла быть недостаточная адекватность критерия оптимизации.

Наиболее надежным источником сведений о слабейшей сейсмичности юга Сахалина с 2003 г. стал третий каталог, формируемый на основе данных локальной сети станций [1]. Судя по графику повторяемости событий на рис. 3, каталог локальной сети содержит без пропусков землетрясения с $M \geq 2.0$. С учетом этого настройка алгоритма выполнялась на данных этого каталога и его пополнений. В качестве переменной x – параметра уравнения (2), использовалась кумулятивная сумма числа толчков (N). Выборки из каталога содержали сейсмические события из нижней полушферы радиуса R с центром на глубине $H = 0$ км.

В данной работе рассмотрена сейсмичность южной части о-ва Сахалин за период 2003–2014 гг. Как было упомянуто выше, за этот период произошло 19 землетрясений в диапазоне магнитуд $M = 4.6–6.2$. Однако 11 из них оказались афтершоками Невельского

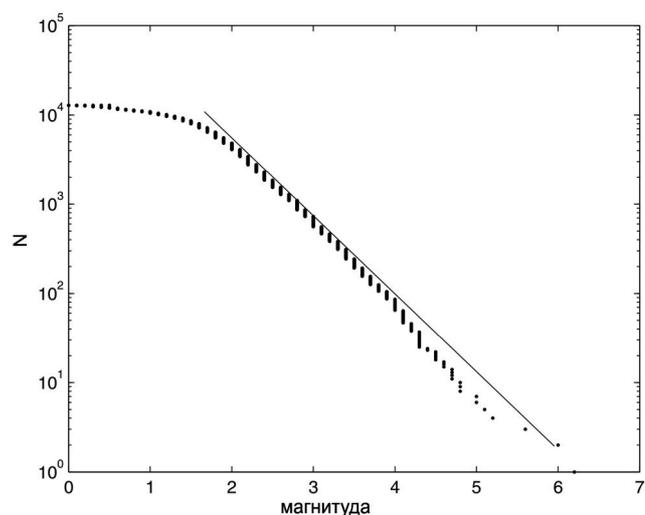


Рис. 3. График повторяемости землетрясений, зарегистрированных локальной сетью автоматизированных сейсмических станций в южной части о-ва Сахалин.

Линия показывает диапазон представительных магнитуд.

землетрясения 2007 г., близкими по времени к основному толчку, поэтому были исключены из обработки. В итоге математические модели строились для восьми последовательностей слабых событий, предварявших землетрясения с $M = 4.6 - 6.2$ (рис. 1, табл. 1).

Первоначальным шагом настройки алгоритма является оценка оптимального радиуса R , определяющего сейсмоактивный объем, из которого берется выборка землетрясений. Оптимальное значение радиуса должно обеспечить достаточное количество землетрясений в выборке. Если их недостаточно (< 20), то результаты настройки будут нестабильны. Экспериментальным путем было установлено, что оптимальное значение радиуса R находится в диапазоне $R = 160-170$ км. Круг с таким радиусом покрывает всю сейсмоактивную зону в южной части о-ва Сахалин.

Кроме этого выявился важный факт, заключающийся в том, что для достижения высокой точности оценок параметра T_0 (времени в очаге прогнозируемого события) нет необходимости варьировать положение центра круговой области, подстраиваясь под вероятное положение эпицентра прогнозируемого землетрясения. Это значительно облегчает процедуру настройки алгоритма и моделирование в реальном времени. С учетом этого обстоятельства положение центра круговой области (47.0° с.ш., 142.5° в.д.) и ее радиус ($R = 166$ км) оставались неизменными в ходе обработки всех последовательностей слабых событий, предварявших сильные землетрясения.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Нами было выполнено ретроспективное моделирование последовательностей землетрясений с $M \geq 2.0$, непосредственно предварявших 8 сильных событий (табл. 1). В итоге были построены математи-

ческие модели нелинейного нарастания параметра N перед сильными землетрясениями (табл. 2).

Рассмотрим более детально обработку последовательностей слабых толчков, зарегистрированных перед землетрясениями с $M \geq 4.7$.

Костромское землетрясение 30 мая 2004 г. (M=4.8)

Это землетрясение произошло 30 мая 2004 г. в 02 час 52 мин 12 с (UTC) в юго-западной части острова Сахалин на глубине $h = 13$ км (рис. 1, строка 1 табл. 2). Его очаг тяготеет к зоне Западно-Сахалинского разлома. На рис. 4а показан график вариаций параметра N – кумулятивной суммы числа толчков (ступенчатая кривая) во времени перед главным событием за период 10.10.2003 г. – 30.05.2004 г. Выборка землетрясений из каталога с $M \geq 2.0$ в нижней полусфере радиуса $R=166$ км для упомянутого выше периода содержит 109 событий. Хотя нелинейность процесса на рис. 4а выражена слабо, тем не менее, результаты моделирования с помощью алгоритма СРП (гладкая кривая) достаточно устойчивы. Вертикальная асимптота указывает на оси X оценку момента возникновения землетрясения 30 мая 2004 г. (оценка времени в очаге следующая: 30.05.2004 г. 03 час 05 мин 25 с (UTC)). Разность между оценкой T_a (вертикальной асимптотой решения уравнения 2) и фактическим моментом времени в очаге T_0 ($\Delta T = T_a - T_0$) составляет 13.2 мин.

Монеронское землетрясение 18 декабря 2004 г. (M=4.7)

Хотя с момента сильнейшего на Сахалине Монеронского землетрясения 1971 г. ($M_s = 7.5$) прошло более 40 лет, тем не менее, в его очаговой области периодически происходят повторные толчки с $M \sim 4$

Таблица 1. Сильные землетрясения юга Сахалина с $M \geq 4.6$ (без близких по времени афтершоков) за период 2004-2014 гг.

№ п/п	Дата, время в очаге (UTC)	Координаты эпицентра		Глубина очага, км	Магнитуда
		Широта, N, град	Долгота E, град		
1	30.05.2004 г. 02:52:12	47.328	142.133	13.3	4.8
2	18.12.2004 г. 06:22:09	46.573	141.060	14.4	4.7
3	25.06.2005 г. 17:17:33	45.969	142.121	4.1	4.6
4	17.08.2006 г. 15:20:35	46.510	141.916	7.7	5.6
5	02.08.2007 г. 02:37:36	46.829	141.756	10.6	6.2
6	04.07.2013 г. 11:08:28	46.730	141.859	13.0	5.2
7	25.11.2013 г. 03:23:53	45.790	141.783	13.0	5.2
8	16.12.2014 г. 13:26:31	47.050	142.086	10.0	4.6

Таблица 2. Результаты моделирования последовательности сейсмических событий, предвещающих сильные землетрясения юга Сахалина.

№ п/п	Дата, время в очаге землетрясения (UTC) и магнитуда	Характеристика обрабатываемой последовательности слабых толчков				Параметры модели СРП			Ошибка прогноза	
		Начало выборки	Конец выборки	Длительность в сутках	Число событий	α	k	T_a	$T_a - T_0$, час:мин	$\Delta T =$
1	30.05.2004 г. 02:52:12 $M = 4.8$	10.10.2003 20:44:53	30.05.2004 02:52:12	232.26	107	4.572	0.0835	30.05.2004 03:05:25	00:13	
2	18.12.2004 г. 06:22:09 $M = 4.7$	23.09.2004 14:35:25	18.12.2004 06:22:09	85.65	47	2.590	0.1033	18.12.2004 06:22:09	00:00	
3	25.06.2005 г. 17:17:33 $M = 4.6$	02.05.2005 22:31:31	25.06.2005 17:17:33	53.78	29	5.351	0.2448	25.06.2005 20:16:12	02:59	
4	17.08.2006 г. 15:20:35 $M = 5.6$	18.05.2006 04:01:19	17.08.2006 15:20:35	91.47	41	3.650	0.1493	2006/08/17 15:38:08	00:17	
5	02.08.2007 г. 02:37:36 $M = 6.2$	23.06.2007 10:56:06	2007/08/02 02:37:36	39.65	43	3.565	0.0360	2007/08/02 02:58:13	00:21	
6	04.07.2013 г. 11:08:28 $M = 4.6$	29.06.2012 12:24:21	04.07.2013 11:08:28	369.95	450	6.459	0.0007	04.07.2013 11:08:51	00:23	
7	25.11.2013 г. 03:23:53 $M = 5.2$	10.09.2007 04:15:47	25.11.2013 03:23:53	2267.96	337	6.552	12.186	26.11.2013 22:02:35	1.777 сут	
8	16.12.2014 г. 13:26:31 $M = 4.6$	21.09.2014 09:38:22	10.12.2014 20:07:42	80.44	124	3.639	0.0038	16.12.2014 03:17:07	-10:09	

и более. Одним из таких заметных событий явилось землетрясение 18.12.2004 г. в 06 час 22 мин 09 с на глубине $h = 14$ км (рис. 1, строка 2 табл. 2). На рис. 4б показан график вариаций параметра N (ступенчатая кривая) во времени перед главным событием за период 23.09.2004 г. – 18.12.2004 г. Выборка слабых землетрясений с $M \geq 2.0$, предвещающих основной толчок за упомянутый выше период, содержит 47 событий в нижней полусфере радиуса $R=166$ км. Эта последовательность характеризуется резкой нелинейностью процесса, поэтому ее моделирование не представляет трудностей и дает устойчивые результаты. Оценка параметра T_0 , определяемая вертикальной асимптотой, соответствует 18.12.2004 г. в 06 час 22 мин 09 с (UTC). Она с точностью до секунд совпадает со временем в очаге Монеронского землетрясения 2004 г.

Горнозаводское землетрясение 17 августа 2006 г. ($M=5.6$)

Это землетрясение произошло 17 августа 2006 г. в 15 час 20 мин 35 с (UTC) на юго-западном побережье острова Сахалин на глубине около 7.5 км (рис. 1, строка 4 табл. 2). Оно ощущалось почти во всех населенных пунктах Южного Сахалина. С наибольшей силой землетрясение проявилось в пос. Горнозаводск – 7 баллов по 12-балльной шкале $MSK-64$. Основные повреждения зданий и сооружений наблюдались в г. Невельск, поселках Горнозаводск, Лопатино и Шебунино. В двух первых пунктах отмечено массовое падение труб, разрыв подземных водоводов, раскрытие трещин в грунте.

Рассмотрим временной ход параметра N за период наблюдений с 18.05.2006 г. по 17.08.2006 г. (ступенчатая кривая на рис. 4в). Выборка землетрясений из каталога с $M \geq 2.0$ в нижней полусфере радиуса $R=166$ км за этот период содержит 41 сейсмическое событие.

Нелинейное развитие сейсмического процесса во времени на рис. 4в хорошо выражено, поэтому прогнозирование момента главного удара дает устойчивые оценки параметра T_a . Гладкая кривая на рис. 4в получена в результате моделирования с помощью алгоритма СРП. Вертикальная асимптота T_a указывает на оси X прогнозную оценку момента возникновения землетрясения (17.08.2006 г. в 15 час 38 мин 08 с (UTC)). Разность между оценкой T_a (вертикальной асимптотой решения уравнения 2) и фактическим моментом времени в очаге T_0 составляет 17.6 мин.

Представляет интерес, насколько устойчива оценка времени главного толчка в зависимости от длительности обрабатываемой последовательности? Из графика на рис. 5 видно, что оптимальные оценки данного параметра для этой последовательности достигаются на интервале обработки 91–104 суток.

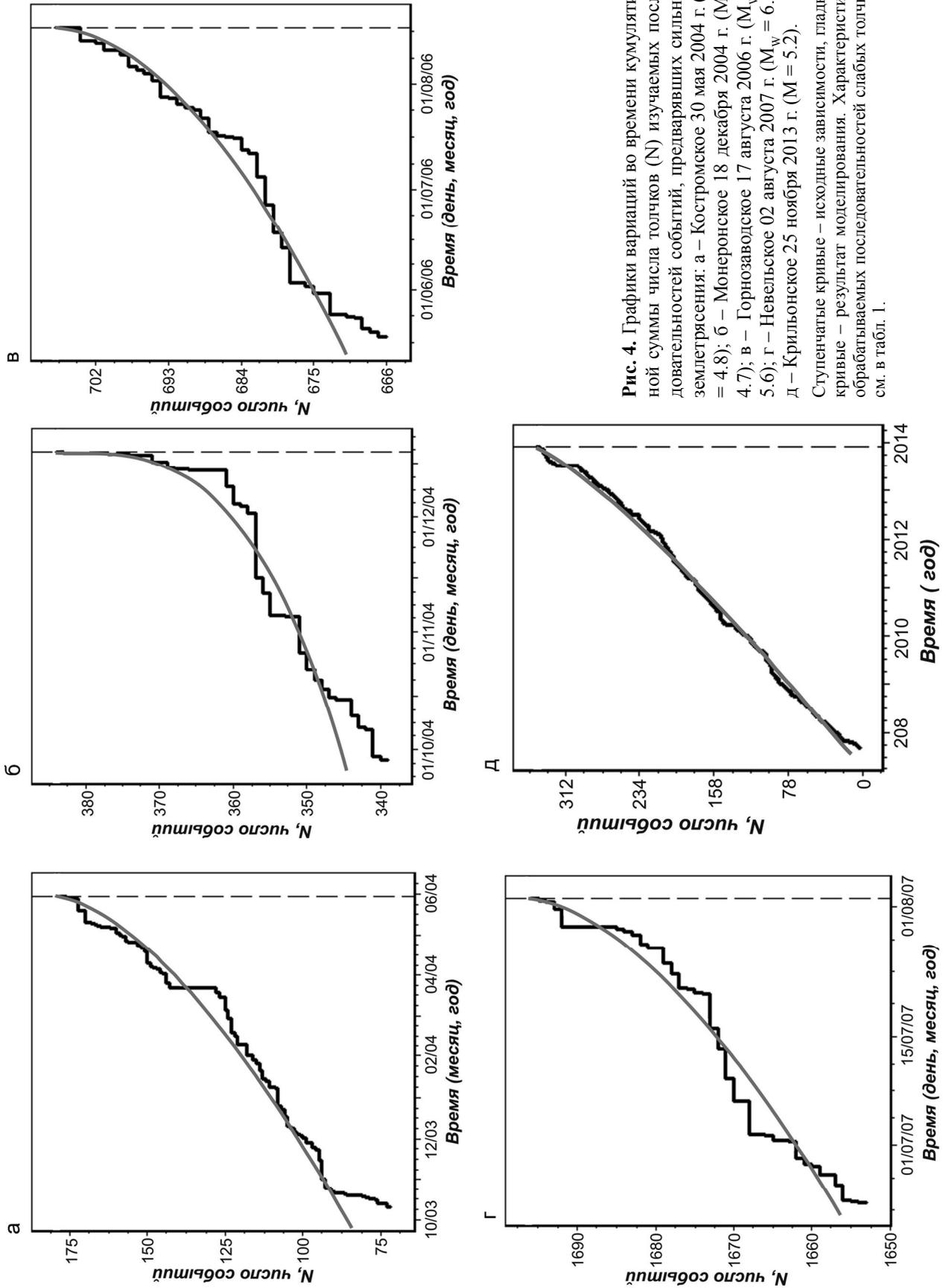


Рис. 4. Графики вариаций во времени кумулятивной суммы числа толчков (N) изучаемых последовательностей событий, предвалявших сильные землетрясения: а – Костромское 30 мая 2004 г. ($M = 4.8$); б – Монеронское 18 декабря 2004 г. ($M = 4.7$); в – Горнозаводское 17 августа 2006 г. ($M_w = 5.6$); г – Невельское 02 августа 2007 г. ($M_w = 6.2$); д – Крильонское 25 ноября 2013 г. ($M = 5.2$).
 Ступенчатые кривые – исходные зависимости, гладкие кривые – результат моделирования. Характеристики обрабатываемых последовательностей слабых толчков см. в табл. 1.

Невельское землетрясение 02 августа 2007 г. ($M_w = 6.2$)

Данное землетрясение произошло 02 августа 2007 г. в 02 час 37 мин 36 с (UTC) на глубине около 10.5 км чуть севернее Горнозаводского толчка 2006 г. в Татарском проливе в пределах Западно-Сахалинской системы разломов (рис. 1, строка 5 табл. 2). После Монеронского события 1971 г. ($M_s = 7.5$) Невельское землетрясение 2007 г. явилось наиболее сильным землетрясением на юге Сахалина. В результате его был разрушен г. Невельск и возникли волны цунами высотой до 3.5 м. Как сказано выше, Невельское землетрясение было предсказано нами в рамках долгосрочного прогноза [13–15]. Детальное описание данного землетрясения сделано в монографии [4].

В г. Невельск землетрясение ощущалось с силой 7–8 баллов в зависимости от локальных грунтовых условий, Горнозаводске – 6–7, Холмске – 5–6, Южно-Сахалинске – 3–4 балла. Сильные разрушения зданий и сооружений в г. Невельск были обусловлены дефицитом их сейсмостойчивости до 1.5–2.0 баллов.

На рис. 4г показан результат обработки последовательности слабых событий перед главным толчком на интервале времени 23.06.2007 – 02.08.2007 гг. Из рис. 4г видно, что ход параметра N имеет четко выраженный нелинейный характер. Оценка положения вертикальной асимптоты T_0 соответствует 02.08.2007 г. в 02 час 58 мин 13 с (UTC). Разность между оценкой и фактическим значением времени в очаге (ΔT) равна 20.6 мин.



Рис. 5. Ошибки оценки времени в очаге (ΔT) Горнозаводского землетрясения 2006 г. ($M_w = 5.6$) в зависимости от длительности обрабатываемой последовательности.

Крильонское землетрясение 25 ноября 2013 г. ($M = 5.2$)

Данное землетрясение произошло 25 ноября в 03 час 23 мин 53 с (UTC) чуть южнее п-ова Крильон на глубине $h = 13$ км (рис. 1, строка 7 табл. 2). С наибольшей интенсивностью сотрясений (4 балла) оно ощущалось в ближайшем к эпицентру населенном пункте – пос. Шебунино. Данный случай представляет интерес с точки зрения прогнозирования события, расположенного на краю исследуемой территории. График активизации сейсмичности перед этим землетрясением (рис. 4д) отличается от предыдущих слабой нелинейностью, но, тем не менее, ретроспективно моделируется удовлетворительно. Оценка параметра T_0 , определяемая вертикальной асимптотой, соответствует 26.11.2013 г. в 22 час 02 мин 35 с (UTC). Ошибка прогноза ΔT составляет 1.777 суток.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Территория острова Сахалин с прилегающим шельфом является областью с умеренным уровнем коровой сейсмичности. Однако из-за близости очагов землетрясений к некоторым населенным пунктам опасность могут представлять также и события с $M \sim 5.0$. Все землетрясения такой силы на юге Сахалина приурочены в основном к трем основным системам глубинных разломов в земной коре: Ребун-Монеронской на юго-западном шельфе острова, Западно-Сахалинской и Центрально-Сахалинской (рис. 1).

За изучаемый период наблюдений на юге Сахалина с помощью локальной сети сейсмических станций (2003–2014 гг.) нами рассмотрены 8 последовательностей слабых толчков ($M \geq 2.0$), зарегистрированных непосредственно перед событиями с $M = 4.6–6.2$ (табл. 1). В процессе предварительной настройки алгоритма СРП выбран оптимальный сейсмоактивный объем (нижняя полусфера радиуса $R = 166$ км) с центром в точке 47.0° N , 142.5° E . Все события, попадавшие в эти сейсмоактивные объемы, образовывали обрабатываемые выборки землетрясений. В качестве параметра уравнения (2) послужила кумулятивная сумма числа толчков в соответствующих выборках.

Основные результаты обработки изучаемых последовательностей представлены в табл. 2. Из нее видно, что длительности обрабатываемой последовательности толчков (параметр D), приведенные в 5-ом столбце табл. 2, имеют значительный разброс. Аномально короткий интервал времени (39.65 суток) для последовательности толчков перед Невельским землетрясением 2007 г. обусловлен необходимостью исключения из обработки интенсивной афтершоковой последовательности Горнозаводского землетрясения 2006 г. Полностью исключить эти афтершоки не удалось, поэтому

объемы выборок за 91 сутки и 39 суток оказались примерно одинаковы (см. 6-ой столбец табл. 2).

Значения параметра α , приведенные в 7-ом столбце табл. 2, характеризуют степень нелинейности хода сейсмичности при значительных ее отклонениях от стационарного состояния. Они имеют значительный разброс. Точность оценки параметра T_0 в значительной мере зависит от адекватности оценки параметра α . А эта оценка, в свою очередь, определяется оптимальным выбором участка обработки.

Следует обратить внимание на то, что все графики вариаций кумулятивной суммы числа толчков во времени (рис. 4), кроме одного, имеют характерную особенность. Она состоит в том, что все обработанные кривые имеют характерный излом в начальной части. В точке излома происходит резкое снижение скорости сейсмического процесса, которая далее начинает снова нарастать, причем особенно резко перед главным событием. Наличие излома может служить указанием на переход процесса подготовки сильного землетрясения в заключительную краткосрочную стадию при обработке последовательности толчков в реальном времени, когда момент возникновения прогнозируемого землетрясения (T_0) неизвестен.

Нами был проведен специальный вычислительный эксперимент, чтобы оценить изменчивость параметров модели и устойчивость оценки времени T_0 при последовательном удалении из обработки событий в начале выборки до точки излома. Оказалось, что уменьшение объема выборки за счет событий до точки излома, как правило, не приводит к резкому изменению параметров модели, и положение асимптоты зависимости $N = f(t)$ остается устойчивым.

В данной работе получена высокая точность прогноза времени возникновения сильного землетрясения, составляющая часы и минуты. Она не должна вводить нас в заблуждение, поскольку результаты моделирования получены ретроспективно. В данном случае в обработке использовалась вся последовательность слабых толчков до момента возникновения сильного события. Поэтому оценки точности при ретроспективной обработке не имеют прямого отношения к точности прогнозов в реальном времени. Конечно, при обработке данных в реальном времени точность оценки параметра T_0 будет хуже. Ответ на вопрос о том, насколько хуже, может дать только практика реальных прогнозов. Опыт имитации работы алгоритма СРП в режиме реального времени [13] показал, что при пополнении каталога землетрясений с запаздыванием, не превышающем сутки, возможно получение приемлемых по точности результатов.

Подведем итоги обсуждения результатов обработки. Можно сделать предварительный вывод о том, что

цель данной статьи достигнута. Показана принципиальная возможность краткосрочного прогноза времени возникновения сильных землетрясений в южной части о-ва Сахалин. Окончательное суждение о возможности надежного краткосрочного прогноза для изучаемого региона можно сделать только после накопления большего объема данных каталога с уровня сейсмичности $M = 2.0$. Для постановки практических прогнозных работ на Сахалине необходимо решить технические вопросы по сбору данных с цифровых станций наблюдений в реальном времени. Это позволит решить проблему значительного запаздывания при выпуске детального каталога землетрясений Сахалина.

ВЫВОДЫ

В данной работе выполнено математическое моделирование во времени последовательностей слабых землетрясений юга Сахалина на основе метода саморазвивающихся процессов. При настройке его алгоритма на данные детального каталога землетрясений южной части о-ва Сахалин установлено, что оптимальный радиус сейсмоактивного объема (нижней полусферы), выборка из которого дает хорошие результаты прогноза времени в очаге для событий с $M = 4.6 - 6.2$, составляет 160 - 170 км. Круг с таким радиусом покрывает всю сейсмоактивную зону юга Сахалина.

Выявлен важный факт, облегчающий процедуру настройки алгоритма и моделирование в реальном времени. Он заключается в том, что для достижения высокой точности оценок параметра T_0 (времени в очаге прогнозируемого события) нет необходимости подстраивать положение центра круговой области под вероятное положение эпицентра прогнозируемого землетрясения. Положение центра круговой области и ее радиус остаются неизменными в ходе обработки всех последовательностей слабых событий, предва- ривших сильные землетрясения.

В ходе обработки 8 последовательностей толчков с $M \geq 2.0$, зарегистрированных непосредственно перед землетрясениями с $M = 4.6 - 6.2$, показано, что асимптота зависимости параметра N от времени (T_0) указывает на оси X время, хорошо совпадающее с моментом возникновения основного землетрясения T_0 . Для выборок событий, включающих основной толчок, ошибка прогноза времени в его очаге при ретроспективном моделировании в одном случае составила первые сутки, а в остальных - часы и даже минуты. Следует подчеркнуть, что эти оценки точности, полученные при ретроспективной обработке, не имеют прямого отношения к точности прогнозов в реальном времени. Оценки реальной точности могут быть получены только в ходе практики реальных прогнозов.

Однако уже сейчас, опираясь на эксперименты по имитации работы алгоритма СРП в режиме реального времени, можно сказать, что при пополнении используемого каталога землетрясений с запаздыванием, не превышающем сутки, возможно получение приемлемых по точности результатов.

Для постановки экспериментальных прогнозов сейсмических толчков с $M \sim 5-6$ в реальном времени на юге Сахалина необходима организация телеметрической системы сбора информации с локальной сети наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог землетрясений юга Сахалина за период с 2000 по 2010 г. (по данным автономных цифровых сейсмических станций) / Ч.У. Ким, Е.П. Семенова, О.А. Жердева и др. Владивосток: Дальнаука, 2011. 357 с.
2. Краева Н.В. Методика и результаты непрерывных (1992–2002 гг.) наблюдений сейсмичности юга Сахалина цифровой станцией IRIS // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока и Восточной Сибири: Материалы Междунар. науч. симпозиума, Южно-Сахалинск, 24–28 сентября 2002 г. Т. 2. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2003. С. 89–112.
3. Левин Б.В., Ким Ч.У., Тихонов И.Н. Горнозаводское землетрясение 17(18) августа 2006 г. на юге Сахалина // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 2. С. 102–108.
4. Левин Б.В., Тихонов И.Н., Кайстренко В.М. и др. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / Отв. ред. Б.В. Левин, И.Н. Тихонов. М.: Янус-К, 2009. 204 с.
5. Малышев А.И. Динамика спонтанных процессов // Геодезия – сейсмология: деформации и прогноз: Материалы междунар. симпозиума. Ереван, 1989. С. 111–112.
6. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61–72.
7. Малышев А.И., Тихонов И.Н., Дугарцыренов К.Ц. Методика построения математических моделей развития форшоковых последовательностей сильных курильских землетрясений. (Препринт). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1992. 35 с.
8. Малышев А.И., Тихонов И.Н. Некоторые закономерности сейсмичности региона Японии перед сильными землетрясениями за 1985–1988 гг. // Вулканология и сейсмология. 1996. № 3. С. 53–65.
9. Малышев А.И. Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 111 с.
10. Малышев А.И., Тихонов И.Н. Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени // Физика Земли. 2007. № 6. С. 37–51.
11. 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.
12. Тихонов И.Н. Результаты моделирования последовательностей мелкофокусных землетрясений юга Сахалина с целью прогноза времени возникновения толчков с $M \geq 4.0$ // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока и Восточной Сибири: Материалы Междунар. науч. симпозиума, Южно-Сахалинск, 24–28 сентября 2002 г. Т. 2. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2003. С. 53–63.
13. Тихонов И.Н. Методы и результаты анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий. Владивосток, Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 214 с.
14. Тихонов И.Н. Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе острова Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 года // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 22–29.
15. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. Confirmed prediction of the 2 August 2007 MW 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia) // Tectonophysics. 2010. V. 485, iss. 1–4. P. 85–93.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

I.N. Tikhonov, V.I. Mikhaylov, A.I. Malyshev

Modeling the southern Sakhalin earthquake sequences preceded strong for short-term prediction of the time of their occurrences

Retroactive modeling of sequences of shallow-focus weak earthquakes ($M \sim 2.0-3.0$) in the Southern Sakhalin for the period of 2003–2014 has been fulfilled using the method of self-developing process and the catalogue data of the local network. Mathematical models of a non-linear increase of the cumulative amount of shocks before strong ($M = 4.6-6.2$) events have been constructed. Short-term forecasts of the parameter T_0 (occurrence time of strong aftershocks) were obtained with a high degree of accuracy. Stability of the solutions obtained by varying the duration of the observation interval of catalog's data is shown. A gradual decrease of error in the prediction of the T_0 parameter is achieved as we approach the end of the treatment interval to the time of the main shock. Although in retroactive version of calculation error in the prediction does not exceed the first day, the real evaluation of the accuracy can only be obtained in the practice of real predictions. Meanwhile, in the present work we show a fundamental possibility of a short-term prediction of strong shallow-focus earthquakes in the Southern Sakhalin.

Key words: crust seismicity, earthquake catalog, sequence of seismic shocks, mathematical modeling, main shock, prediction of origin time, the Southern Sakhalin.