

ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА 2006-2011 гг. И УСПЕШНЫЙ ПРОГНОЗ СРЕДНЕ-КУРИЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 15.XI 2006 г., $M_s = 8.2$

© 2007 г. С. А. Федотов, А. В. Соломатин, С. Д. Чернышев

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Статья опубликована в журнале ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ, 2007. № 3, с. 3-25

Рассматриваются результаты продолжения работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, основанного на закономерностях "сейсмических брешей" и сейсмического цикла. Приводится прогноз для всех участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, данный на 5 лет, IV 2006-IV 2011 гг. По нему наиболее вероятными местами следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ являлись район г. Петропавловска-Камчатского, где вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу 7-9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, равнялась 48% в 2006-2011 гг., и район о. Онекотан и Средних Курильских островов, где вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$ оценивалась величиной 26.7%. Этот прогноз успешно подтвердился 15.XI 2006 г., когда в районе Средних Курильских островов произошло землетрясение с $M_s = 8.2$, $M_w = 8.3$. Дается обновленный долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XI 2006-X 2011 гг. Полученные долгосрочные сейсмические прогнозы являются основанием для принятия мер по сейсмобезопасности и проведения работ по сейсмоусилению зданий и сооружений на Камчатке.

Введение

Долгосрочный сейсмический прогноз - одно из самых важных направлений исследований и работ по прогнозу и оценке сейсмической опасности. Курило-Камчатская дуга является наиболее сейсмичным регионом России. Сейсмичность достигает здесь наивысшего уровня, существующего на Земле. Именно для этого региона и сходных с ним структур в 1965-1968 гг. был предложен метод долгосрочного сейсмического прогноза, основанный на закономерностях размещения вероятных мест следующих сильнейших землетрясений ("сейсмических брешей") и сейсмического цикла [9, 10]. Метод непрерывно применяется, совершенствуясь со временем. 20 основных работ по этому методу и обзор результатов 1962-2002 гг. приведены в [12]. В последней работе, приведенной в этой книге, даны прогноз на 2001-2005 гг. и описание метода по состоянию на 2002 г. [16]. Оценка предыдущих прогнозов и прогноз на 2004-2008 гг. приведены в [14].

В круг задач и вопросов долгосрочного сейсмического прогноза входят изучение закономерностей сейсмической деятельности, составление и совершенствование долгосрочных сейсмических прогнозов, получение данных об опасности сильных землетрясений, необходимых для подготовки к ним и для принятия мер по предотвращению ущерба и потерь. На основании данных, полученных этим методом, в 1986-2001 и последующих годах было принято шесть правительственных постановлений и решений о заблаговременной подготовке Камчатки к сильным землетрясениям [12 и др.].

В настоящее время по этому методу прогнозируется ряд характеристик сейсмичности Курило-Камчатской дуги на следующие пять лет. Выделяются места следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ ("сейсмические брешы"); к ним относятся участки, в которых таких землетрясений не было в течение последних 80 лет. Наиболее активная полоса сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги с глубинами очагов 0-80 км, имеющая длину 2100 км и ширину 100 км, делится в среднем на 20 участков. Для них прогнозируются стадии сейсмического цикла, указываются места "сейсмических брешей", определяется относительная опасность "сейсмических брешей", прогнозируются сейсмическая активность A_{10} (число слабых землетрясений энергетического класса [11] $K_s = 10$ или $M = 3.5$ в год на площади 10^3 км^2), магнитуды M землетрясений, ожидающихся с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные магнитуды землетрясений и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ [12, 14, 15, 16, 20-22 и др.]. Долгосрочные сейсмические прогнозы сильнейших землетрясений 1965-2005 гг. оправдывались с вероятностью 0.8-0.9 [12].

Долгосрочные сейсмические прогнозы составляются на 5 следующих лет, так как величины параметров, на основании которых составляются прогнозы, определяются за предшествующие

5 лет и их значения предсказываются на следующие 5 лет, а землетрясения с $M \geq 7.7$ повторяются во всей Курило-Камчатской дуге в среднем один раз в пять лет [9, 12, 14, 15, 16, 20, 21 и др.], раздел 1 этой работы.

Прогнозы обновляются через полгода или чаще, если происходят сильные землетрясения и существенно меняются параметры сейсмичности за предыдущие пять лет. Полученные прогнозы сопоставляются с долгосрочными сейсмическими прогнозами, полученными другими методами (М8 и др.), [3, 7, 14-17, 20, 22 и др.].

Метод может применяться в других регионах мира, имеющих сходные структуру, геодинамику и сеймотектонику. Один из последних примеров применения рассматриваемого метода в других регионах мира дан в [14], в которой построен ретроспективный долгосрочный сейсмический прогноз для Хоккайдского землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2001-2005 гг. приведен в [16], на 2004-2008 гг. в [14]. В данной работе приводится прогноз, составленный в апреле 2006 г. на IV 2006-IV 2011, раздел 2 этой работы.

Через 8 месяцев после составления этого прогноза 15.XI 2006 г. в районе Средних Курильских островов произошло землетрясение с $M_S = 8.2$, $M_w = 8.3$. Это было самое сильное землетрясение, появившееся на Курило-Камчатской дуге после Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8-7.9$ [17, 22]. Средне-Курильское землетрясение произошло в соответствии с долгосрочными сейсмическими прогнозами, дававшимися на 2001-2005, 2004-2008 и IV 2006-IV 2011 гг. [9, 10, 12, 14 и др.]. (До этого ряд исследователей считал, что землетрясение с $M \geq 7.7$ невозможно в этом районе [5, 8 и др.]). Это успешное подтверждение долгосрочного сейсмического прогноза рассматривается в разделе 3. В разделе 5 дополнительно приводятся также первые прогнозы сильных афтершоков ($M \geq 6$) Средне-Курильского землетрясения. После Средне-Курильского землетрясения и первых 10 дней его афтершоков был составлен обновленный долгосрочный сейсмический прогноз на XI 2006-XI 2011 гг., в котором учтены произошедшие изменения в прежних "сейсмических брешах" на Средних Курильских островах и возникшее перераспределение вероятности землетрясения с $M \geq 7.7$ в остальных участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, раздел 4.

В разделе 5 даются дополнения, обсуждаются результаты работы, отмечаются улучшения в методике, а также сообщается о практическом применении этих прогнозов.

В Заключение приводятся основные результаты работы.

1. О построении долгосрочных сейсмических прогнозов для Курило-Камчатской дуги на IV 2006-IV 2011 и XI 2006-XI 2011 гг.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2004-III 2009 гг. приведен в [14]. После него прогнозы обновлялись три раза через полгода в 2004-2005 гг. Они давались на следующие пятилетние интервалы времени: XI 2004-X 2009, VI 2005-V 2010 и IX 2005-IX 2010 гг.¹ При каждом таком обновлении прогнозов в расчетах использовались сейсмологические данные за предшествующие 5 лет, и при этом временное окно и массив исходных данных менялись на 1/5. Совершенствовалась методика расчетов.

В 2004-2005 гг. на Курило-Камчатской дуге не было землетрясений с $M \geq 7.7$, а изменения в трех названных прогнозах были небольшими. Сохранялся наиболее важный результат - самая высокая вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ в течение следующих 5 лет оставалась в районе главного города региона, Петропавловска-Камчатского. Значения этой вероятности, полученные в разных вариантах расчетов, были в интервале 46.9-48.5%.

В разделах 2 и 4 данной статьи приводятся и сравниваются два следующих долгосрочных сейсмических прогноза для Курило-Камчатской дуги, составленных на периоды IV 2006-IV 2011 и XI 2006-X 2011 гг. Прежде, чем перейти к этим прогнозам, кратко напомним о ряде основных положений метода и способах расчета прогнозируемых величин.

Курило-Камчатская дуга является, в основном, крупной вытянутой сеймотектонической структурой, длина которой 2000 км. Столетние сейсмологические наблюдения показали, что уровень сейсмичности больших участков дуги, длина которых вдоль дуги более 100 км, является в первом приближении одинаковым. Некоторое снижение уровня сейсмичности может быть в районе Средних Курильских островов, но Средне-Курильское землетрясение 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, показало, что и здесь возможны землетрясения с $M \geq 7.7$.

По инструментальным и историческим данным определено, что средняя длительность сейсмического цикла или промежутков времени T между двумя последовательными землетрясениями с $M \geq 7.7$ в одном месте распределяется по нормальному закону: $T_1 = 140 \pm 60$ лет или $T_2 = 120 \pm 50$ лет [10, 12, 18, 21 и др.]. Эти выражения используются для определения вероятности возникновения зем-

¹ Эти прогнозы регистрировались Советом Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и Камчатского филиала (КФ) Геофизической службы (ГС) РАН, приводились в еженедельных сообщениях Совета, сообщались РАН, государственным учреждениям и местным властям и приводились в научных отчетах.

летрясений с $M \geq 7.7$ в течение следующих 5 лет. Вероятность возникновения таких землетрясений в течение первых 0-80 лет цикла невелика ~ 0.16 . Зато вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ после первых 80 лет цикла в течение последующих лет до его завершения равна 0.84. Места, в которых землетрясений с $M \geq 7.7$ не было в течение 80 и более лет, считаются вероятными местами следующих сильнейших землетрясений или "сейсмическими брешами" [9, 12].

Сейсмический цикл делится на три стадии: I - стадия афтершоков, длящаяся 10-15 лет; II - длительная стадия стабильного режима; III - заключительная стадия, стадия форшоков, длящаяся 10-15 лет. Относительная опасность "сейсмических брешей" и вероятность наступления III стадии цикла оцениваются по отклонению нескольких параметров сейсмичности от их средней величины на II стадии цикла. Это: сейсмическая активность A_{10} — нормированное число слабых землетрясений энергетического класса $K_S = 10$, $M = 3.5$ в год на площади 10^3 км^2 (шкала K_S дана в [11]), D - относительная величина сброшенной сейсмической энергии, $D(t) = E_2(t)/E_1$, где $E_2(t)$, Дж/год $\cdot 10^3 \text{ км}^2$ - нормированная величина сейсмической энергии, выделяющейся в рассматриваемом участке за время t , а E_1 , Дж/год $\cdot 10^3 \text{ км}^2$ - средняя нормированная величина сейсмической энергии, выделяющейся в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне [10, 12, 15, 18, 20, 21 и др.].

Величины A_{10} и D определяются для 5-летних интервалов времени в больших участках сейсмогенной зоны, размер которых меняется от $200 \times 100 \text{ км}$ до $100 \times 50 \text{ км}$, равняясь в среднем $150 \times 75 \text{ км}$ или $11 \cdot 10^3 \text{ км}^2$. Последние цифры близки к средним размерам очагов землетрясений с $M \geq 7.7$.

$P(A_{10})$ и $P(D)$ - вероятности того, что во время II стадии цикла случайно появятся величины A_{10} и D , которые превысят наблюдаемые A_{10} и D . Параметр $V = P(A_{10}) \cdot P(D)$ показывает относительную опасность "сейсмических брешей".

В данной работе вводится дополнительный параметр A_{11} , - число землетрясений класса $K_S = 11$, $M = 4.3$ в год на площади 10^3 км^2 . Этот параметр удобен тем, что такие землетрясения полно представлены во многих каталогах. $P(A_{11})$ - вероятность того, что A_{11} в большой области очага сильнейшего землетрясения за 10-15 лет до него будет случайно больше наблюдаемой ее величины. Относительная опасность "сейсмических брешей" оценивается также по параметрам $V_1 = P(A_{10}) \cdot P(D) \cdot P(A_{11})$ и $V_2 = P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11})$.

Сейсмический процесс на III стадии сейсмического цикла может иметь сложный характер: наблюдаются группирование землетрясений, сейсмические затишья, форшоковая активизация и др. Но в большинстве случаев в обширной области очага готовящегося землетрясения с $M \geq 7.7$ и вокруг нее в течение последних 5-10 лет цикла происходило значимое возрастание A_{10} , D и A_{11} [12, 14, 15, 16, 20, 21 и др.].

Величины A_{10} прогнозируются по зависимости $\lg A_{10}(t) \pm \sigma$, построенной для сейсмического цикла. Магнитуды землетрясений средней силы, ожидающихся с вероятностями $P = 0.8, 0.5$ и 0.15 , определяются по зависимости $\lg D(t) \pm \sigma$, построенной для сейсмического цикла.

Максимальные возможные магнитуды M_{\max} оцениваются по размерам "сейсмических брешей". Размеры участков учитываются при подсчете прогнозируемых величин вероятностей. M_{\max} определяются по зависимости длины области очага L от магнитуды M для сильных землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса [15, 20]. Построение долгосрочных сейсмических прогнозов для Курило-Камчатской дуги и способы расчета прогнозируемых величин, которые совершенствовались со временем, описаны в большом числе работ, среди которых можно выделить [10, 12, 14, 15-18, 20, 21 и др.].

Приведем дополнительные сведения о том, к какому интервалу времени следует относить названные выше прогнозы вероятностей возникновения землетрясений $P(M \geq 7.7)$ во всех выделенных участках основной сейсмогенной полосы Курило-Камчатской дуги.

Длительности промежутков времени Δt между сильнейшими землетрясениями с $M \geq 7.7$ всей Курило-Камчатской дуги за 1904-2006 гг. представлены в табл. 1.

За 1904-2006 гг. имеются полные данные о числе курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ [1, 4, 8 и др.]. В табл. 1 приведен список 21 такого землетрясения. Среди них двойные землетрясения № 1 (1904 г.), № 13 (1969 г.) и № 16 (1978 г.) принимаются за одно событие. Землетрясение № 3 (1917 г.) может быть вне выбранной полосы прогноза для курило-камчатских землетрясений (раздел 2, рис. 2). Землетрясение № 5 (1918 г.) может быть афтершоком землетрясения № 4, а землетрясение № 7 (1923 г.) — сильным афтершоком мощного Камчатского землетрясения № 6. Часть очага землетрясения № 8 (1952 г.), произошедшего у побережья острова Хоккайдо, находится вне полосы прогноза. Средний интервал времени между 19 землетрясениями 1904-2006 гг. в табл. 1 равен 5.7 лет. Он был так велик из-за того, что между крупнейшими камчатскими землетрясениями 1923 и 1952 гг. с $M = 8.5$ был спокойный интервал продолжительностью 29 лет.

Распределение сильных курило-камчатских землетрясений ($M \geq 7 \frac{3}{4}$) во времени в 1904-1963 гг. исследовалось в [9, 12]. Были отмечены плохое согласие распределения числа землетрясений по интервалам времени с законом Пуассона и малая вероятность случайного появления периода покоя 1924-1951 гг. Имевшиеся тогда данные говорили в пользу того, что сильные курило-камчатские землетрясения 1904-1963 гг. были, скорее, не случайными, а взаимосвязанными событиями, которые группировались в активных периодах, продолжительностью 30-40% от полного времени.

Однако последовательность 12 курило-камчатских землетрясений 1952-2006 гг., № 8-19 (табл. 1) была гораздо более равномерной. Средняя продолжительность 11 интервалов между землетрясениями 1952-2006 гг. равна 5.0 ± 4.4 лет. Такое распределение близко к показательному распределению в процессе Пуассона с параметром $\lambda = 1/\sigma \approx 0.21$ [6]. (По оценкам, сделанным ранее в [16], параметр $\lambda \approx 0.2$).

Таблица 1. Землетрясения Курило-Камчатской дуги 1904-2006 гг., $M \geq 7.7$, $H < 100$ км

№	Год	Дата	Время, час, мин.	Район	с.ш. ^о	в.д. ^о	H, км	M	Δt , лет
1	1904	25.VI	14.45	Южная Камчатка	52.0	159.0	15-60	7.7	
	1904	25.VI	21.00		52.0	159.0	15-60	7.7	
2	1915	1.V	05.00	Восточнее о-ва Онекотан	48.4	155.5	30±30	8.3	11
3	1917	30.I	02.45	Камчатский залив	55.2	164.5	5-20	8.1	1.8?
4	1918	7.IX	17.16	Восточнее о-ва Уруп	45.6	151.1	40+20	8.2	1.7
5	1918	8.XI	04.38	Юго-восточнее о-ва Уруп	44.9	151.4	40±40	7.9	0.1
6	1923	3.II	16.01	Восточнее Камчатки	53.0	161.0	10-40	8.5	4.3
7	1923	24.II	07.34	Камчатский залив	55.0	162.4	10-40	7.7	0.1?
8	1952	04.III	01.22	Юго-восточнее Хоккайдо	41.9	143.7	50±10	8.3	29
9	1952	4.XI	16.58	Камчатское	52.3	161.0	10-40	8.5	0.7
10	1958	6.XI	22.58	Итурупское	44.5	148.5	40±20	8.2	6
11	1959	4.V	07.15	Мыс Шипунский	53.1	160.3	20±10	7.7	0.5
12	1963	16.X	05.17	Урупское	44.8	149.5	47±10	8.1	4.5
13	1969	11.VIII	21.27	Южно-Курильское	43.6	147.8	40±10	8.2	5.8
	1969	11.VIII	21.27		43.6	147.2	38±15	7.8	
14	1971	15.XII	08.29	Камчатский залив	55.9	163.4	20-30	7.9	2.3
15	1973	17.VI	03.55	Кунашир	43.2	145.9	55±10	7.9	1.5
16	1978	23.III	03.15	Восточнее Итурупа	43.9	148.9	40	7.8	4.7
	1978	24.III	19.47		43.9	149.1	39	8.0	
17	1994	13.X	13.22	Шикотанское	43.7	147.6	33	8.0	16.5
18	1997	5.XII	11.26	Кроноцкое	54.7	162.4	33	7.9	3.2
19	2006	15.XI	11.14	Средне-Курильское	46.7	153.2	28	8.2	9.0

Примечание. Перечислены землетрясения, происходившие в полосе прогноза (рис. 2). Групповые землетрясения 1904, 1969 и 1978 гг. принимались за одно событие. Землетрясение № 3, 1917, 30.I может быть вне полосы прогноза. Δt , лет - интервалы времени между последовательными землетрясениями (области очагов землетрясений показаны на рис. 2).

При разделении периода времени 1951-2006 гг. на 11 интервалов длительностью 5 лет каждый, получается, что в эти годы наблюдалось 2 интервала, в которых было 2 события, 7 интервалов, в которых было 1 событие и 2 интервала, в которых не было землетрясений с $M \geq 7.7$. Одно или два землетрясения с $M \geq 7.7$ происходили в 9 случаях из 11 или в 82% случаев, а таких землетрясений не было в 2 случаях из 11 или в 18% случаев.

Оценим вероятность появления интервалов времени без землетрясений с $M \geq 7.7$, длительность которых больше 5 лет.

На рис. 1 показана зависимость количества $N(\Delta t)$ курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ от длительности интервала времени Δt между ними, график 1, и изменение вероятности $P(t)$ возникновения таких землетрясений в зависимости от времени ожидания t , график 2. График 2 рассчитан по соотношению $P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, где P - вероятность появления следующего землетрясения в течение времени ожидания t , а λ - параметр распределения Пуассона [6]. Судя по графикам 1 и 2, интервалы времени между землетрясениями с $M \geq 7.7$ в 66% случаев меньше 5, лет, а появление интервалов Δt более 10 лет возможно, но является редким событием, вероятность которого менее 0.1.

Отметим некоторые условия, следующие из изложенного.

Принимается, что сейсмический процесс в больших участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, размеры которых меняются в пределах $(5-20) \times 10^3 \text{ км}^2$, протекает, в первом приближении, одинаково.

Приблизительно в 20 его участках независимо развивается сейсмический цикл, стадия которого зависит от времени t_0 предыдущего землетрясения с $M \geq 7.7$; длительность цикла 140 ± 60 или 120 ± 50 лет.

Сильнейшие землетрясения на всей Курило-Камчатской дуге повторяются в среднем через 5 лет и рассматриваются, в первом приближении, как независимые события. Появление следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ неизбежно, и вероятность этого события равна 1. По эмпирическим данным, вероятность появления 1-2 землетрясений с $M \geq 7.7$ в течение 5 лет равна ≈ 0.8 . Поэтому, если допустить, что вероятность появления землетрясения в течение 5 лет равна 1, что соответствует их средней повторяемости, то из-за появления временных интервалов без землетрясений с $M \geq 7.7$ реальная вероятность такого события около 0.8.

Вероятность появления пятилетнего интервала без землетрясения с $M \geq 7.7$ около 0.2.

Появление двух пятилетних интервалов подряд, в которых нет землетрясений с $M \geq 7.7$, является редким событием, вероятность которого менее 0.1.

Землетрясения с $M \geq 7.7$ в различных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги считаются независимыми несовместимыми событиями, вероятности которых могут суммироваться.

На основании названных условий в приближенных расчетах принимается, что средняя суммарная вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ в течение 5 лет во всех 20 участках равна 100% [12, 14, 16 и др.]. Это означает, что возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ в течение 5 лет в разных участках рассматриваются как несовместимые события, сумма вероятностей которых равна 1. При этом учитывается, что такое землетрясение с $M \geq 7.7$ наступает в течение 5 лет с вероятностью 0.8.

В том случае, когда для рассматриваемого участка известно время t_0 возникновения предшествующего землетрясения с $M \geq 7.7$, вероятность возникновения следующего такого землетрясения в любом заданном интервале времени (t_1, t_2) после t_0 может быть оценена по нормальному закону распределения длительности сейсмического цикла $T_1 = 140 \pm 60$ или $T_2 = 120 \pm 50$ лет. Соответствующие две оценки вероятностей возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ делались для менее опасных участков, где такие землетрясения были в течение последних 80 лет. Учитывалось то, что если землетрясения с $M \geq 7.7$ не было до настоящего времени t_n , то вероятность его возникновения в последующие годы остается равной 1. Размеры участков учитывались введением поправок $L/150 \text{ км}$, где L - длина участка в км, а 150 км - их средняя длина. В результате определяются вероятности $P_3(M \geq 7.7)$ и $P^*_3(M \geq 7.7)$ для $T_1 = 140$ лет и $T_2 = 120$ лет, а также их средние значения для отдельных участков и сумма вероятностей возникновения таких землетрясений, $\Sigma P_3(M \geq 7.7)$, во всех участках, где $t_n - t_0 \leq 80$ лет [10].

Принимается, что сумма вероятностей возникновения с $M \geq 7.7$ в остальных участках зоны прогноза, "сейсмических брешах", равна $[1 - \Sigma P_3(M \geq 7.7)]$. Практически она оказывается равной 0.8-0.9. Эта часть полной вероятности распределяется между "сейсмическими брешах" пропорционально величине $(1-B)$ для каждой из них. В этих расчетах также учитываются относительные размеры участков "сейсмических брешей".

Как отмечалось выше, сумма вероятностей возникновения несовместимых событий, землетрясений с $M \geq 7.7$ в течение 5 лет во всех участках зоны, принимается равной 1. Величины $P(M \geq 7.7)$, рассчитанные таким образом, относятся к следующим 5 годам.

Пятилетние интервалы времени, в которых не было землетрясений с $M \geq 7.7$, в 1952-2006 гг. наблюдались в 18% случаев. Поэтому значение $P(M \geq 7.7)$ для "сейсмических брешей" могут в среднем быть на ~ 0.2 меньше тех, которые рассчитываются для наблюдавшейся средней вероятности одного землетрясения с $M \geq 7.7$ в Курило-Камчатской дуге в течение 5 лет.

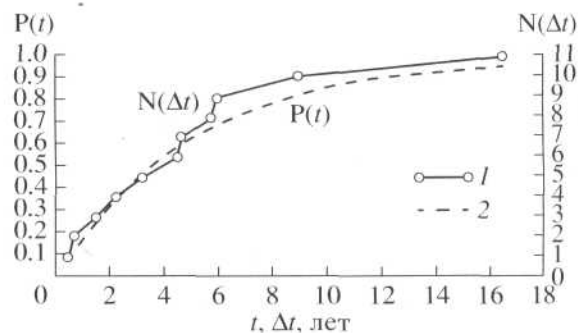


Рис. 1. Зависимость количества $N(\Delta t)$ курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ от длительности интервала времени Δt между ними и изменение вероятности возникновения таких землетрясений $P(t)$ от времени ожидания t . 1 - эмпирический график распределения количества N возникших землетрясений в зависимости от интервала времени Δt , лет, построен на основе 11 интервалов Δt , наблюдавшихся в 1952-2006 гг.; 2 - теоретический график распределения вероятности $P(t)$ возникновения землетрясения в зависимости от интервала времени ожидания t , лет, рассчитанный по распределению Пуассона $P(\Delta t < t) = 1 - e^{-\lambda t}$ со значением $\lambda = 0.2$.

табл. 2. Указаны "сейсмические бреши", которые являются наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений, и определяется их относительная опасность (рис. 2, табл. 2). Значения $P(M \geq 7.7)$ определены по величинам трех параметров A_{10} , D и A_{11} . В табл. 2 для сравнения показаны также вероятности землетрясений $P(M \geq 7.7)$ и относительная опасность "сейсмических брешей", которые были получены при долгосрочном сейсмическом прогнозе, построенном по параметрам A_{10} и D , на 2001-2005 гг.

Прогноз для Курило-Камчатской дуги. Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на IV 2006-IV 2011 гг. по всем 20 участкам, на которые разделена сейсмогенная зона у Курильских островов и Камчатки (табл. 2, рис. 2), заключаются в следующем.

Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ на период IV 2006-IV 2011 гг. остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловска-Камчатского:

- для Авачинского залива (рис. 2, участок 12б) вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ на IV 2006-IV 2011 гг., имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, по-прежнему очень высока - 14.6%;

- для южной Камчатки (участок 11б) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, равна 16.8%;

- для юго-восточной части Кроноцкого залива (участок 13а) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу до 7 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, равна 10.4%.

Суммарная вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$, имеющих силу 7-9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, в трех наиболее опасных участках 11б, 12б и 13а равна 41.8%.

Землетрясения, имеющие силу 7-8 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, с меньшей вероятностью могут произойти в участках 11а, 12а, 13б. Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в участках 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б, которые могут иметь силу 7-9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, таким образом, может достигать 48.0% (табл. 2). При этом вероятность возникновения в г. Петропавловске-Камчатском в период времени с IV 2006 по IV 2011 гг. землетрясений силой 9 баллов равняется 14.6%, а землетрясений силой 8 и 7 баллов - 33.4%.

По-прежнему существует значительная вероятность ($P = 8.0\%$) сильнейшего землетрясения с $M \geq 7.7$ в районе 15 участка, Камчатский залив (рис. 2, табл. 2).

На Курильских островах высока сейсмическая опасность для 9, 7, и 8 участков, о. Онекотан - Средние Курильские о-ва (рис. 2, табл. 2) - общая вероятность 23.7%, а вместе с 6 участком (пролив Буссоль), который также относится к "сейсмическим брешам", - 26.7%.

По сравнению с прогнозом, данным в октябре 2005 г., с 7.9 до 9.6% увеличилась вероятность для участка 7, наиболее опасного на Средних Курильских островах. (Именно в нем 15.XI 2006 г. произошло землетрясение с $M_S = 8.2$, $M_w = 8.3$, раздел 3).

По-прежнему высока вероятность для 1 участка, п-ов Немуро (рис. 2, табл. 2). По последним оценкам, этот участок остается третьим - четвертым по степени опасности ($P = 10.0\%$ в IV 2006-IV 2011 гг.).

$P(M \geq 7.7) = 8\%$ в Камчатском заливе, участок 15.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность возникновения сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ равна средней или существенно, до 10-15 раз, ниже средней, которая равна 3.6%-4.2%.

Таким был долгосрочный сейсмический прогноз, данный за 8 месяцев до Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_S = 8.2$, $M_w = 8.3$.

Как уже отмечалось выше, этот прогноз был принят Советом Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов и разослан в 14 адресов учреждений и специалистов в еженедельных сообщениях Совета, в том числе МЧС России, администрации Камчатской области, Российскому экспертному совету (РЭС) МЧС и РАН и др.

Таблица 2. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2006-IV 2011 гг. ($H \leq 80$ км), полученный с использованием параметров A_{10} , D , A_{11} и сравнение с вероятностями сильнейших землетрясений, полученными в октябре 2004 г.

Участок	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2001-2006 гг. (III 2001 г. – III 2006 г.)					Прогноз на IV 2006 – IV 2011 гг.										Прогноз на IX 2004 - IX 2009 гг.	
								$A_{10}(P \sim 0.7)$		$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	M_{\max}	$P(M \geq 7.7)\%$	Вероятная очередность	$P(M \geq 7.7)\%$	Вероятная Очередность		
			Стадия	$P_1=P(A_{10})$	$P_2=P(D)$	$P_3=P(A_{11})$	$B = (P_1 \cdot P_2 \cdot P_3)$	A_{10}	$A_{10 \pm \sigma}$										
1	0 – 100	Мыс Сириха - п-ов Немуро	III	0.21	0.01	0.94	0.002	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	10.0 (3.9)	4 (7)	13.2	2		
2	100 – 200	П-ов Немуро - о-в Зелёный	II					1.2	0.8 - 1.9	5.8	6.3	6.8		0.7 (0.5)		0.6			
3а	200 – 300	О-в Шикотан, Ю-В	II					1.2	0.8 - 1.9	5.7	6.2	6.7		0.8 (0.6)		0.7			
3б	200 – 300	О-в Шикотан, С-З	I					2.1 → 1.4	0.9 - 3.1	6.0	6.4	6.9		0.3 (0.2)		0.3			
4	300 – 450	О-в Итуруп	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		1.6 (1.4)		1.5			
5	450 – 600	Пролив Фриза - о-в Уруп	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		1.4 (1.1)		1.3			
6	600 – 750	Мыс Кастрикум - пр. Буссоль	III?	0.97	0.98	0.73	0.70	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	3.0 (7.7)	9 (5)	1.4 – 4.4	9		
7	750 – 950	О-в Симушир - пр. Крузенштерна	III?	0.98	0.54	0.86	0.45	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.2	6.7	7.2	8.2	9.6 (11.7?)	5 (3)	9.4	5		
8	950 - 1100	О-в Шиащкотан	III?	0.99	0.58	0.95	0.55	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	5.5 (3.5)	8 (8)	7.2	7		
9	1100 - 1200	О-в Онекотан - пр. 3-й Курильский	III	0.87	0.16	0.90	0.13	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	8.6 (5.8)	6 (6)	7.7	6		
10	1200 - 1350	О-в Парамушир - мыс Лопатка	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		2.0 (2.7)		1.9			
11а	1350 - 1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6 - 1.1	5.8	6.3	6.8		2.6 (3.6)		2.5			
11б	1350 - 1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.64	0.87	0.25	0.14	1.3 – 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	16.8 (18.3)	1 (2)	10.6	4		
12а	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, Ю-В	II					1.2	0.8 - 1.9	5.7	6.2	6.7		2.0 (2.7)		1.9			
12б	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, С-З	III	0.20	0.79	0.19	0.03	1.2 – 3	0.8 - 4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	14.6 (20.5)	2 (1)	19.6	1		
13а	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.89	0.82	0.37	0.27	1.2 – 3	0.8 - 4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	10.4 (3.6)	3	5.3	8		
13б	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, С-З	II					2.6	1.7 - 3.9	5.9	6.4	6.9		1.6 (1.3)		1.5			
14	1850 - 1950	П-ов Кроноцкий	I					3.1 → 1.9	1.2 - 4.5	6.0	6.5	7.0		0.3 (0.2)		0.2			
15	1950 - 2050	Зал. Камчатский	III?	0.32	0.69	0.83	0.18	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	8.0 (8.5)	7 (4)	12.9	3		
16	2050 - 2100	П-ов Камчатский	II					0.8	0.6 - 1.1	5.7	6.2	6.7		0.4 (0.3)		0.3			
Оценка критических значений вероятностей					0.062	0.308	0.06	0.0012							$\Sigma = 100.0$		$\Sigma = 101$		

Примечание. Даны прогнозы характеристик сейсмичности на IV 2006-IV 2011 гг. Для всех 20 участков указываются вероятные стадии сейсмического цикла. Индексом III отмечены те участки, в которых землетрясения с $M \geq 7.7$ не происходили в течение последних 80 лет и где значительна вероятность прихода заключительной, III стадии сейсмического цикла. Знаками вопроса отмечены те из участков, в которых вероятность такого события меньше. В - параметр, показывающий относительную опасность "сейсмических брешей"; A_{10} - сейсмическая активность; $P \sim 0.8, 0.5, 0.15$ - вероятности землетрясений с $M = 5.7-7.2$; M_{\max} - максимальная возможная магнитуда; $P(M \geq 7.7)$ - прогнозируемые вероятности сильнейших землетрясений. Значения вероятности $P(M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их величинам на 2001-2005 гг. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6-4.2\%$.

3. Успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_s = 8.2$

В самом начале исследований по долгосрочному сейсмическому прогнозу, в 1965 г. при построении первой карты очагов Курило-Камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$, было выяснено, что нет достоверных исторических и инструментальных данных о возникновении таких землетрясений в районе Средних Курильских о-вов и о. Шиащкотан (расстояние 750-950 км вдоль Курило-Камчатской дуги, рис. 2). Поэтому этот район был отнесен к числу вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ или "сейсмических брешей" [9]. Этот участок № 7 ограничен с северо-востока областью очага землетрясения 1.V 1915 г., $M = 8.3$, а с юго-запада - областью очага землетрясения 8.XI 1918 г., $M = 8.2$ (табл. 1, рис. 2). Границы очагов этих землетрясений могли быть построены только приближенно по имеющимся координатам их 4-5 главных афтершоков [1, 9]; они были уточнены позднее [15] с учетом данных [4].

К 2001 г. прошло более 80 лет со времени этих двух крупных землетрясений, время сейсмического цикла в их очагах стало больше 140 - $\sigma = 140 - 60$ лет, и они в 1995-2000 гг. также относились нами к наиболее вероятным местам следующих землетрясений с $M \geq 7.7$, "сейсмическим брешам". В Курило-Камчатской дуге появилась наиболее протяженная "сейсмическая брешь" длиной 500 км на расстояниях 650-1150 км вдоль дуги, участки 6, 7, 8 и 9 на рис. 2, [12, 16 и др.].

Эта часть Курильской островной дуги имеет ряд отличий от ее южного и северного звеньев, Южных и Северных Курильских о-вов. Здесь исчезает внешняя островная дуга, представленная Малой Курильской грядой на юге, не были известны сильнейшие землетрясения, меняется строение земной коры. На основании этих и других особенностей некоторые исследователи считали, что максимальные магнитуды землетрясений не могут превышать здесь $M = 7.5 \pm 0.2$ [5, 8 и др.].

Однако вдоль всей Курило-Камчатской дуги и ее Курильской части непрерывно протягиваются главная тектоническая структура - глубоководный желоб, единая сейсмофокальная зона и пояс вулканов. Существуют поперечные разломы, ориентированные вкрест дуги, и другие особенности ее тектонического строения. Но области очагов землетрясений с $M = 7.7-8.5$ имеют размеры очагов от 100 до 600 км. Такие области, рассматриваемые в нашем методе долгосрочного сейсмического прогноза, накладываются на более мелкие тектонические структуры. При составлении долгосрочных сейсмических прогнозов для больших участков Курило-Камчатской дуги принимается, что, в первом приближении, эта дуга является однородной протяженной сеймотектонической структурой, а сейсмичность разных больших участков дуги, ее звеньев длиной 100-200 и более км, одинакова.

15.XI 2006 г. произошло Средне-Курильское землетрясение с $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$, область очага которого заняла всю "сейсмическую брешь" в участке № 7 (табл. 1, рис. 2-6). Это событие доказало возможность землетрясений с $M \geq 7.7$ в районе Средних Курильских о-вов.

Повышенная вероятность сильнейшего землетрясения в районе Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$ предсказывалась с 1965 г. Эта "сейсмическая брешь" была указана на первой карте очагов землетрясений с $M \geq 7.7$ и вероятных мест следующих таких землетрясений в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне в 1965 г. [9]. Затем эта "сейсмическая брешь", участок № 7, расстояние 750-1000 км (750-950 км на рис. 2), указывалась среди наиболее вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ в пятилетних долгосрочных сейсмических прогнозах, дававшихся на 1965-1970 гг., 1971-1975 гг. и последующие пять интервалов лет до 1996-2000 гг. [9, 12, 14, 15 и др.]. Относительная опасность участка № 7 оценивалась в 1965-2005 гг. по пятилетним интервалам времени по параметру $B = P(A_{10}) \cdot P(D)$ [12, 16 и др.]. В 1965-2000 гг. участок № 7 в 3 случаях из 7 был третьим по уровню опасности среди 6-7 "сейсмических брешей" этих лет и среди 20-ти всех выделенных участков сейсмогенной зоны. По данным за IV 2001-III 2006 гг., об относительной опасности сейсмическая оценка "сейсмических брешей" на основе параметра $B = P(A_{10}) \cdot P(D) \cdot P(A_{11})$ с учетом размеров участка L (табл. 2), участок № 7 стал 5-м из всех 20-ти участков по уровню опасности в области всей Курило-Камчатской дуги и первым среди четырех участков № 6-9, образовавших "сейсмическую брешь" длиной 550 км у Средних Курильских островов и о. Шиащкотан (рис. 2, табл. 2).

По долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги на IV 2006-IV 2011 гг. (табл. 2, рис. 2) наибольшая вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$ была в районе г. Петропавловска-Камчатского, участки №№ 11б, 12б, 13а (рис. 2). "Сейсмические брешки", имеющиеся в них, протягиваются на 450 км вдоль Курило-Камчатской дуги. Суммарная вероятность возникновения землетрясения в этих участках $P(M \geq 7.7) = 16.8 + 14.6 + 10.4 = 41.8\%$. Наиболее опасны участки 11б и 12б, находящиеся у побережья Южной Камчатки и в Авачинском заливе в районе г. Петропавловска-Камчатского.

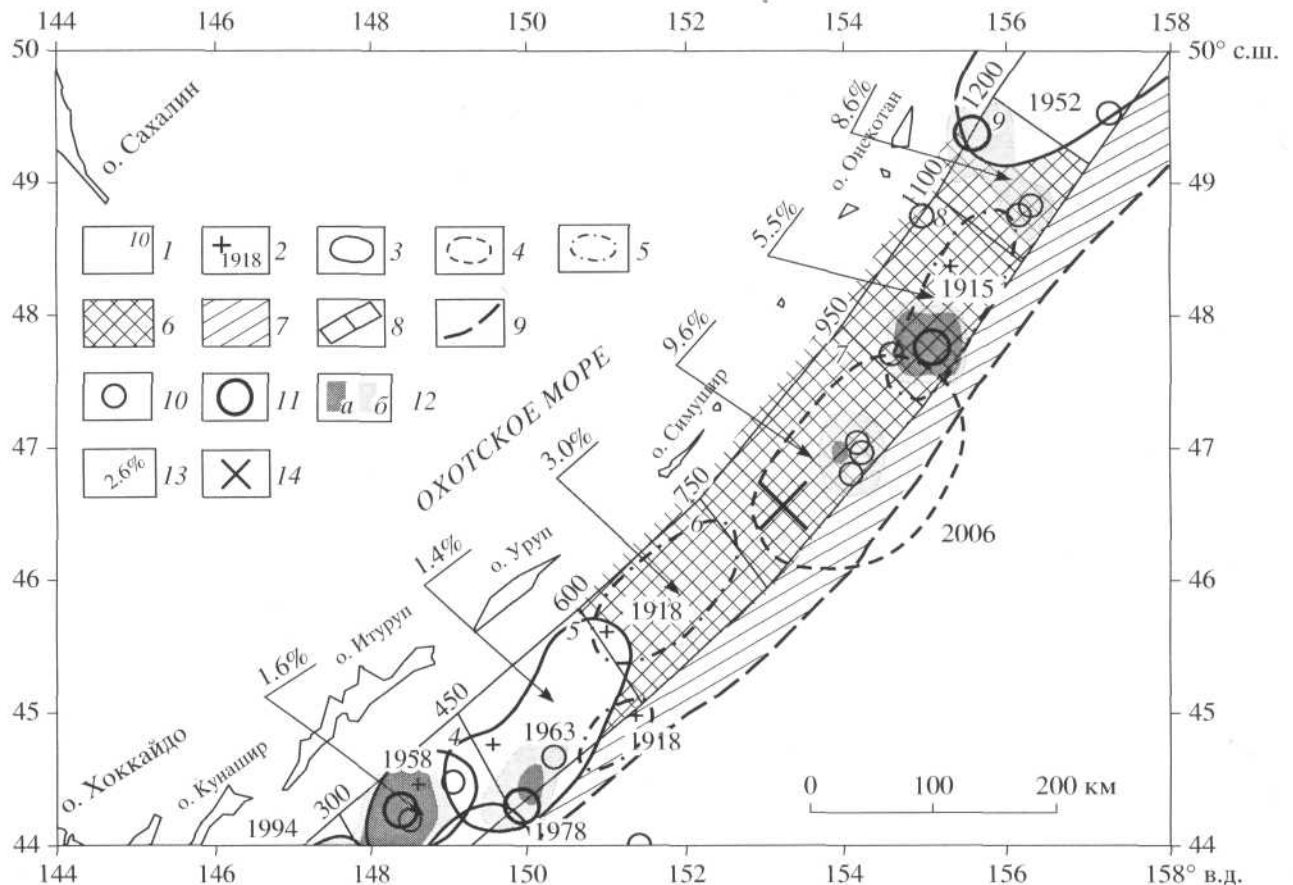


Рис. 3. Карта очагов курило-камчатских землетрясений 1915-2006 гг. с $M \geq 7.7$, $H = 0-80$ км, "сейсмических брешей", изолиний параметра 1-В по данным III 2001-III 2006 гг., а также эпицентров землетрясений за этот период: 1 - номер участка; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 - границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - вероятные области очагов землетрясений 1915-1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6 - наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 7 - возможные места следующих таких землетрясений; 8 - границы участков прогноза; 9 - ось глубоководного желоба; 10 - эпицентры землетрясений за период III 2001-III 2006 гг. с $5.5 \leq m_b < 6.0$; 11 — эпицентры землетрясений за период III 2001-III 2006 гг. с $m_b \geq 6$; 12 - изолинии параметра 1-В для двух уровней: а - 0.9, б - 0.7; 13 - вероятность землетрясений $P(M \geq 7.7)$ на период IV 2006-IV 2011 гг.; 14 - эпицентр Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$.

Суммарная вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ в другой большой "сейсмической брешке" у Средних Курильских о-вов и о. Шикотан, участки № 6-9 (рис. 2) составляла $P(M \geq 7.7) = 3.0 + 9.6 + 3.5 + 8.6 = 24.7\%$, среди которых, по прогнозу, наиболее опасным был участок № 7. Именно в нем 15.XI 2006 г. произошло Средне-Курильское землетрясение с $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$ (табл. 1, рис. 3-5). Это было еще одно важное подтверждение надежности долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, которые даются с 1965 г. [9, 10, 12]. В седьмой раз в 1965 г. подтвердился прогноз места следующего курило-камчатского землетрясения с $M \geq 7.7$. Оно снова произошло в выделенной "сейсмической брешке". В данном случае инструментальный очаг и афтершоки землетрясения 15.XI 2006 г. точно заняли промежуток между очагами землетрясений 1.V 1915 г., $M = 8.1$ и 7.IX 1918 г., $M = 8.3$ (рис. 2-5).

В очередной раз после Шикотанского землетрясения 13.X 1994 г., $M = 8.0$ [19] и Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.9$ [18, 22] следующее сильнейшее землетрясение произошло в тех "сейсмических брешках", которые считались наиболее опасными.

Эти результаты подтверждают данные долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги о том, что наиболее вероятным местом следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ остается район г. Петропавловска-Камчатского. Было великой удачей то, что очередное сильнейшее курило-камчатское землетрясение произошло возле безлюдных Средних Курильских островов, а не у главного города Камчатки и Курильских о-вов - Петропавловска-Камчатского, где оно могло вызвать самые тяжелые последствия.

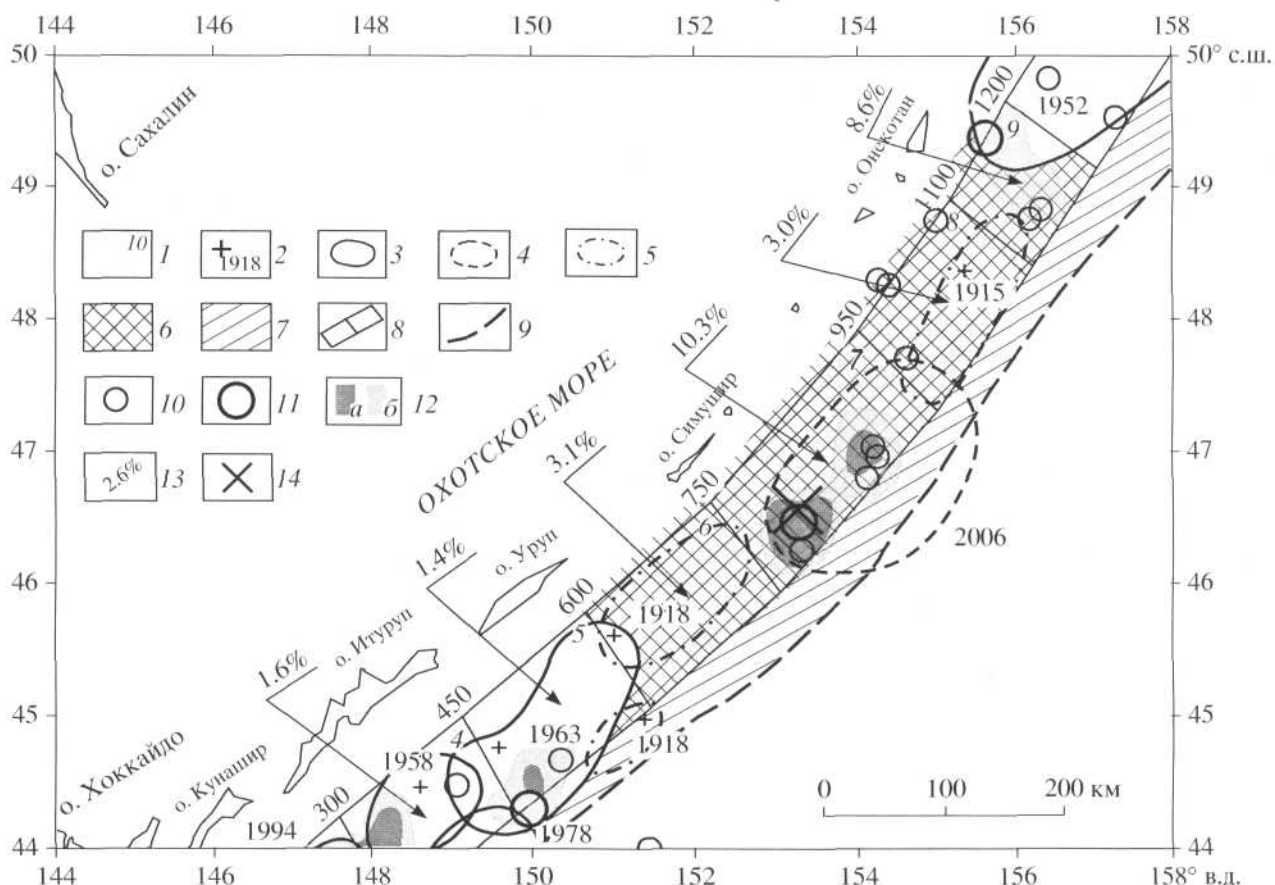


Рис. 4. Карта очагов курило-камчатских землетрясений 1915-2006 гг. с $M \geq 7.7$, $H = 0-80$ км, "сейсмических брешей", изолиний параметра 1-В по данным 15.XI 2001-14.XI 2006 гг., а также эпицентров землетрясений за этот период: 1 - номер участка; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 - границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - вероятные области очагов землетрясений 1915-1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6 - наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 7 - возможные места следующих таких землетрясений; 8 - границы участков прогноза; 9 - ось глубоководного желоба; 10 - эпицентры землетрясений за период 15.XI 2001-14.XI 2006 гг. с $5.5 \leq m_b < 6.0$; 11 - эпицентры землетрясений за период 15.XI 2001-14.XI 2006 гг. с $m_b \geq 6.0$; 12 - изолинии параметра 1-В для двух уровней: а - 0.9, б - 0.7; 13 - вероятность землетрясений $P(M \geq 7.7)$ на период XI 2006-XI 2011 гг.; 14 - эпицентр Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$.

Процесс подготовки Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г. был очень продолжительным и длился более 100 лет. Оно возникло на спокойном фоне без большого влияния областей очагов соседних предшествовавших землетрясений с $M \geq 7.7$ и их афтершоков. В течение 2.5 последних месяцев ему предшествовала выразительная сильная форшоковая активизация. Очень интересны механизм, сеймотектонические условия, необычайно малое цунами и последующее продолжительное развитие роя афтершоков (ко времени завершения этой статьи прошло только 20 дней с его начала). Изучение этих вопросов является предметом дальнейших исследований.

В данной работе в дополнение к оценке прогноза приводятся данные о его подготовке в 2001-2006 гг., его форшоках и первые данные о рое афтершоков. На рис. 3 приведена карта долгосрочного сейсмического прогноза для Средних Курильских о-вов и прилегающих звеньев Курильской дуги на IV 2006-IV 2011 гг., составленные за 7 мес. до Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г. На ней показана основная сейсмогенная полоса, области очагов землетрясений с $M \geq 7.7$ прошедших лет, "сейсмические бреши", прогнозировавшиеся вероятности $P(M \geq 7.7)$ возникновения в период IV 2006-IV 2011 гг. землетрясений с $M \geq 7.7$ (рис. 2, табл. 2).

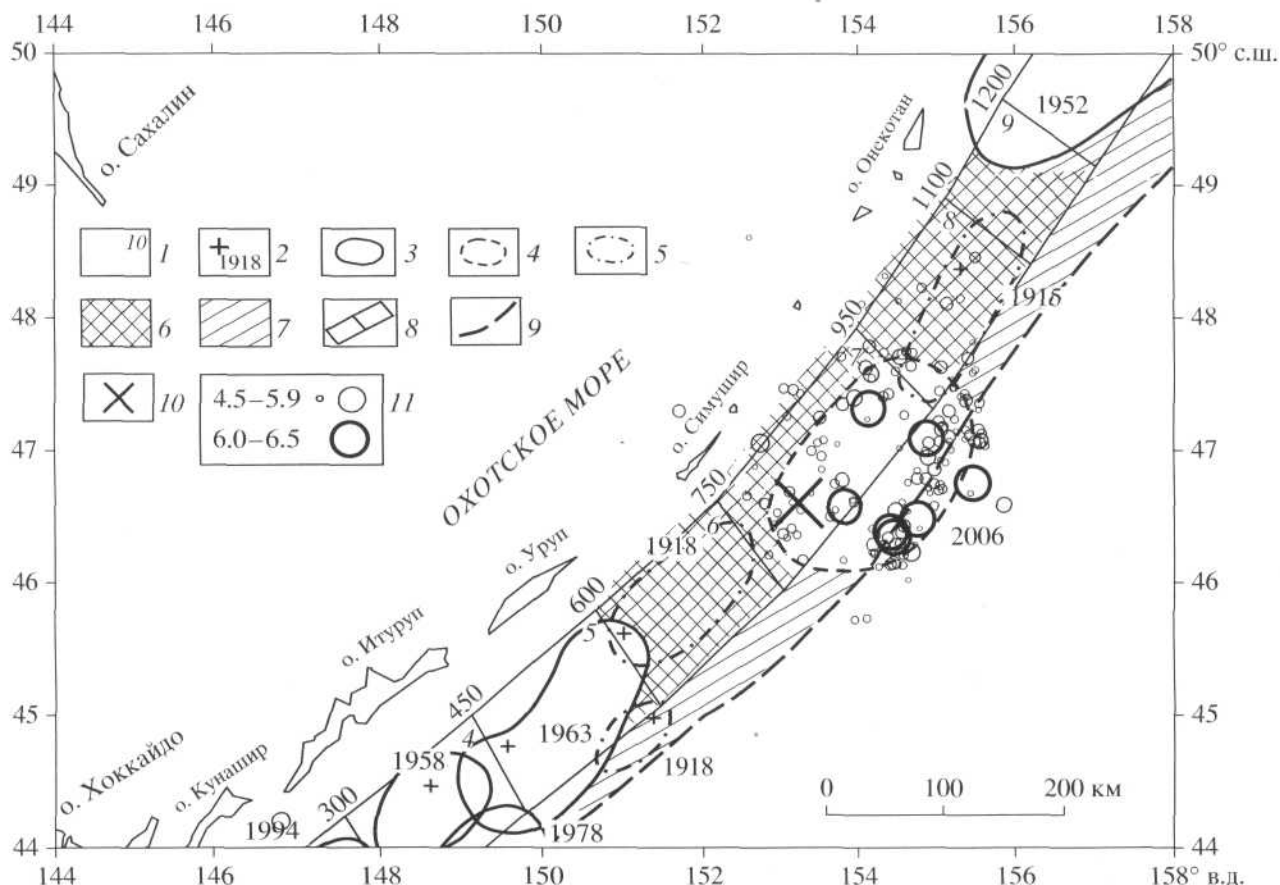


Рис. 5. Карта очагов курило-камчатских землетрясений 1915-2006 гг. с $M \geq 7.7$, $H = 0-80$ км, "сейсмических брешей", а также афтершоков Средне-Курильского землетрясения: 1 - номер участка; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 - границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - вероятные области очагов землетрясений 1915-1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6-наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 7 - возможные места следующих таких землетрясений; 8 - границы участков прогноза; 9 - ось глубоководного желоба; 10 - эпицентр Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_s = 8.2$; 11 - эпицентры афтершоков первых 10 дней с $m_b = 4.5-5.9$ и $6.0-6.5$.

В дополнение к этому показаны эпицентры землетрясений за предшествующие 5 лет III 2001 III 2006 гг. с $m_b = 5.5-5.9$ и $m_b \geq 6.0$, изолинии прогностического параметра $1-B = 1-P(A_{10}) \cdot P(D) = 0.7-0.9$. Вероятности возникновения сильнейшего землетрясения $P(M \geq 7.7)$ в "сейсмической брешии", пропорциональные $1-B$. Значения $1-B$ определялись для кругов диаметром 75 км для пятилетних интервалов времени. Такое пространственно-временное окно позволяет следить за подготовкой землетрясений с $M \geq 7.7$. Необходимо заметить, что изолинии параметра $1-B$ с диаметром круга осреднения 75 км позволяют выделять локальные максимумы этого параметра в больших по размеру участках разбиения сейсмофокальной зоны, и в этом их достоинство. В общем случае средняя оценка параметра $1-B$ по всему участку может отличаться от таких его локальных оценок, и при этом представляется более сбалансированной и надежной величиной. На рис. 3 пунктиром показаны предварительные границы области очага Средне-Курильского землетрясения, построенного только по данным первых 10 дней его афтершоков. В рассматриваемом методе долгосрочного сейсмического прогноза границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$ определяются по изолиниям $A_{10} = 10$ и $D = 1$ и контуру эпицентров с $M \geq 6$ за первый год афтершоков [12, 18, 21]. Таким образом, показанные границы области очага Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г. предстоит уточнить через год.

На рис. 4 показана аналогичная карта со сдвигом в 7 мес. для пятилетнего интервала времени с 15.XI 2001 г. по 14.XI 2006 г., заканчивающегося непосредственно перед землетрясением 15.XI 2006 г. Сравнение карт на рис. 3 и 4 позволяет определить изменения в сейсмической подготовке землетрясения 15.XI 2006 г., которые произошли за предшествовавшие 7 мес. перед ним.

В III 2001-III 2006 г. самые сильные землетрясения происходили в участке № 8 у границы с участком № 7 (в основном в начале этого пятилетнего интервала) и в средней части участка № 7. Они хорошо выделяются максимумами изолиний $(1-B) = 0.7-0.9$ (рис. 3). В течение последних 7 мес. перед Средне-Курильским землетрясением 15.XI 2006 г. усилилась сейсмическая деятельность в средней части его будущего очага. Но главное усиление сейсмичности произошло в течение последних 1.5 мес. в юго-западной части очага в его эпицентре. Максимум величины $(1-B) > 0.9$ в его будущем эпицентре, груп-

па землетрясений в центре будущего очага и максимум сейсмичности, наблюдавшийся перед этим землетрясением в участке № 8, явно обозначили осевую линию приближавшегося землетрясения с $M_w = 8.3$.

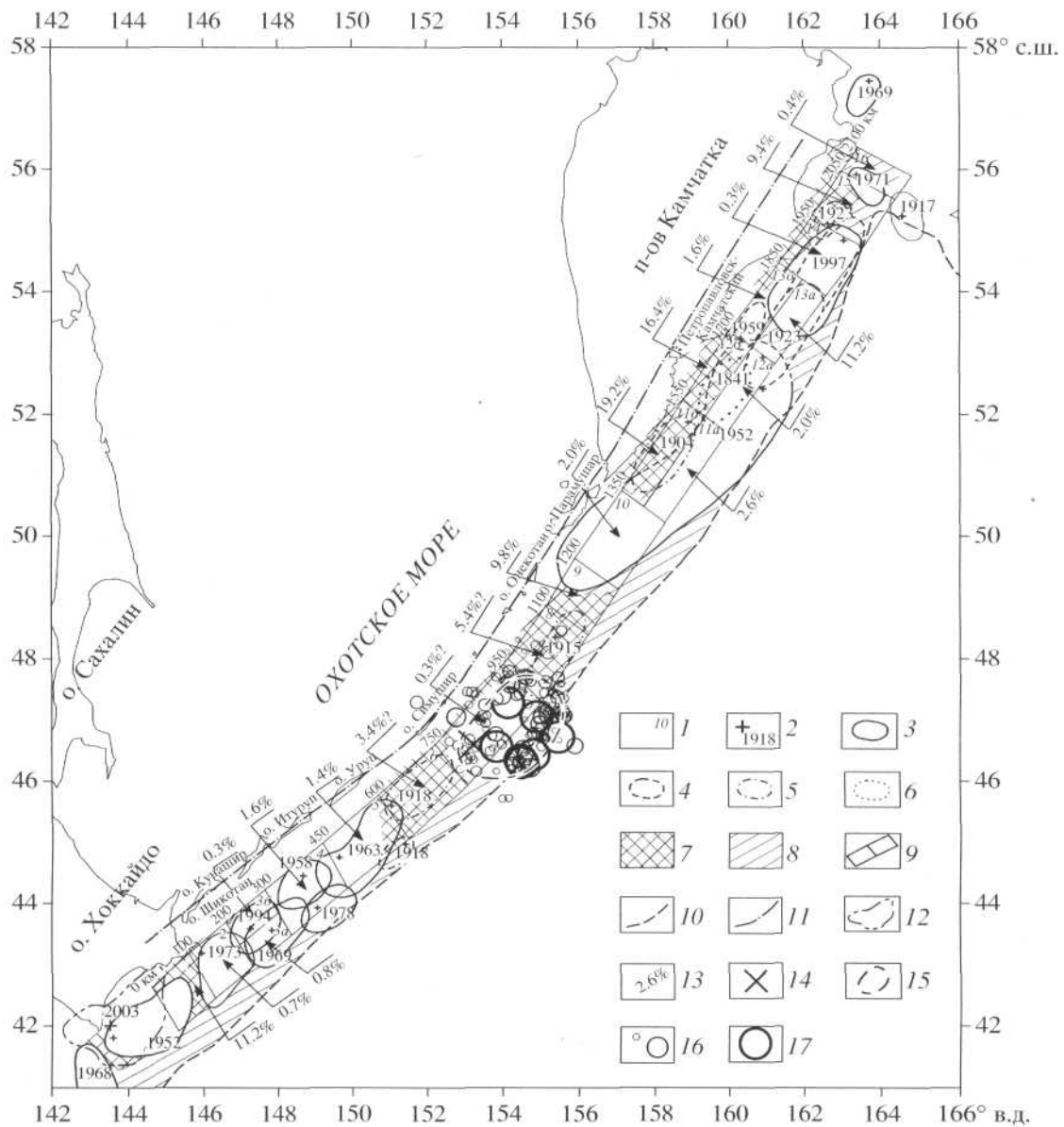


Рис. 6. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на 20.XI 2006-Х.2011 гг., уточненная после Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$, очагов курило-камчатских землетрясений 1904-2006 гг. с $M \geq 7.7$, $H = 0-80$ км, и вероятностей возникновения таких землетрясений в XII 2006-Х 2011 гг. во всех участках полосы прогноза; 1 - номер участка; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 - границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - вероятные области очагов землетрясений 1904—1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6 - предполагается область очага 1841 г.; 7 - наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 8 -возможные места следующих таких землетрясений; 9 - границы участков прогноза; 10 - оси глубоководных желобов; 11 - ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 12 - границы очага землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 13 - вероятности землетрясений $M \geq 7.7$ в период 20.XI 2006-Х 2011 гг.; 14 - эпицентр Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_s = 8.2$; 15 - предварительно определенные границы его очага; 16 - эпицентры афтершоков первых 10 дней с $m_b = 4.5-5.9$; 17 - эпицентры афтершоков первых 10 дней с $m_b = 6.0-6.5$. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6-4.2%.

На рис. 3 и 4 нанесены значения $P(M \geq 7.7)$ для участков № 4-9 Курило-Камчатской дуги, которые прогнозировались по рассматриваемому методу на IV 2006-IV 2011 гг. (рис. 3, табл. 2) и на XI 2006-XI 2011 гг. (данные второго прогноза приводятся в разделе 4).

На рис. 5 показана карта афтершоков Средне-Курильского землетрясения с $M_w = 8.3$, $M_S = 8.2$ за первые 10 дней после него. Среди афтершоков этого периода выделяется рой в районе глубоководного жлоба. В нем было 5 афтершоков с $M \geq 6$ из 6, которые произошли в период 15-16 XI 2006 г. Область форшоковой активизации оказалась относительно спокойной.

В целом рис. 3-5 показывают, что очень точным оказался долгосрочный сейсмический прогноз возможного места следующего курило-камчатского землетрясения с $M \geq 7.7$ и что были правильно выделены 2-3 наиболее опасных "сейсмических брешей" из 20 участков прогноза, в том числе из 8-9 "брешей". Наблюдавшаяся сильная форшоковая активизация также соответствует основному сценарию развития сейсмического процесса, используемому в применяемом методе прогноза.

В дополнение к долгосрочным сейсмическим прогнозам до и после землетрясения с $M \geq 7.7$ даются оценки сейсмической обстановки и прогноз сильных афтершоков ($M \geq 6$) тихоокеанских землетрясений с $M \geq 7.7$ [12, 13, 17, 19, 22, 23 и др.]. Такие прогнозы делались на следующий день после Олюторского землетрясения 21.IV 2006 г., $M_S = 7.9$, и Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_S = 8.2$. Они кратко рассматриваются в разделе 5.

После землетрясения с $M \geq 7.7$ меняется распределение "сейсмических брешей" и прогноз для Курило-Камчатской дуги на следующие 5 лет обновляется. Такой обновленный прогноз приведен в разделе 4.

4. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 20.XI 2006-X 2011 гг.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2006-IV 2011 гг., составленный в апреле 2006 г., приведен в разделе 1. Он был обновлен, как это регулярно делается, через полгода (через 7 мес. в данном случае) 23.X 2006 г. на следующий пятилетний интервал XI 2006-XI 2011 гг. Это произошло за три недели до Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г.² В нем не оказалось значительных отличий от предыдущего прогноза на IV 2006-IV 2011 гг. (раздел 2, табл. 2, рис. 2). Поэтому соответствующие таблица и карта долгосрочного сейсмического прогноза от 23.X 2006 г., который был пересмотрен 19.XI 2006 г., не приводятся в данной статье. Называются только основные цифры.

По долгосрочному сейсмическому прогнозу от 23 октября 2006 г. сейсмофокальная зона Курило-Камчатской дуги делилась на 20 участков - от 1а до 16. Наиболее опасным местом Курило-Камчатской дуги был район г. Петропавловска-Камчатского, для него были получены следующие оценки.

Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ у Южной Камчатки, в Авачинском и Кроноцком заливах (рис. 2, участки 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б), которые могут иметь силу 7-9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, может достигать 49.6% в период времени с XI 2006 по X 2011 гг. При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловске-Камчатском землетрясения силой 9 баллов равняется 14.6%, а землетрясений силой 8 и 7 баллов - 35.0%.

Вторым по степени опасности был район о. Онекотан - Средние Курильские о-ва (участки 7-9, рис. 2). Общая вероятность сильнейшего землетрясения с $M \geq 7.7$ на следующее пятилетие в этом районе составила 21.9%, а для этого района вместе с 6 участком (пролив Буссоль), который также относится к "сейсмическим брешам", - 25.0%.

Значительной была вероятность сильнейшего землетрясения ($M \geq 7.7$) в остальных "сейсмических брешах": район Камчатского залива (участок 15) - 8%, п-ов Немуро (рис. 2, участок 1) - вероятность 10.1%.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность возникновения сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ в течение 5 лет равнялась средней или была существенно, до 10-15 раз, ниже средней (3.6-4.2%).

Таким образом, накануне Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., по долгосрочному сейсмическому прогнозу наибольшая опасность следующих сильнейших землетрясений с магнитудами $M \geq 7.7$ с общей вероятностью около 75% была в районах г. Петропавловска-Камчатского и Средних Курильских о-вов. Этот долгосрочный прогноз оправдался 15.XI 2006 г., когда на Средних Курильских островах произошло землетрясение с $M_w = 8.3$, $M_S = 8.2$. Это было очередное подтверждение долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги.

Как отмечено в разделе 3, были правильно определены вероятное место области очага этого землетрясения ("сейсмическая брешь") и выделены два наиболее опасных из вероятных мест следующих сильнейших землетрясений, имевшихся в Курило-Камчатской дуге.

² Прогноз был рассмотрен и зарегистрирован в Совете ИВиС ДВО РАН и КФ ГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов 23.X 2006 г.

Аналогичные успешные прогнозы давались перед Шикотанским землетрясением у Южных Курильских о-вов (4.X 1994 г., $M = 8.1$) и Кроноцким землетрясением у Восточного побережья Камчатки (5.XII 1997 г., $M = 7.9$) [17, 19, 22 и др.].

После возникновения землетрясения такой силы и заполнения одного из наиболее вероятных мест землетрясения $M \geq 7.7$, вероятность возникновения подобных землетрясений в районе Средних Курильских островов уменьшилась и возросла их вероятность в других "сейсмических брешах". С учетом этого был составлен обновленный сейсмический прогноз на следующие 5 лет. Предлагаемый прогноз является в значительной степени предварительным, т.к. прошло только 5 дней с момента сильнейшего Средне-Курильского землетрясения и продолжается развитие его мощного роя афтершоков. Более точный долгосрочный сейсмический прогноз можно будет дать после того, как произойдет основная масса его афтершоков.

Обновленный долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги, составленный нами 19 ноября, представлен на рис. 6, табл. 3, где указаны эпицентр главного толчка землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$, его афтершоки за период 15-17.XI 2006 г. с магнитудами $M = 4.3-6.5$, а также предварительное определение границ области его очага, которые будут уточнены после прохождения основной массы афтершоков.

Область очага землетрясения точно заполнила сейсмическую брешь, находившуюся между очагами землетрясений 1.V 1915 г., $M = 8.0$ и 7.IX 1918 г., $M = 8.3$. Очаг Средне-Курильского землетрясения расположился в участке № 7 (рис. 5, б), который по предыдущему долгосрочному сейсмическому прогнозу был наиболее опасным в районе Средних Курильских островов. Вероятность возникновения следующего сильнейшего землетрясения в участке 7 будет сильно понижена в следующие десятилетия после первого года афтершоков, когда будет проходить I стадия сейсмического цикла - стадия афтершоков и после нее начнется следующая - II стадия стабильного сейсмического режима.

Учитывая это обстоятельство и то, что в участке 8 существенно повысилась сейсмичность в течение 5 дней после землетрясения, были рассчитаны новые значения вероятности для всех участков Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны на следующие 5 лет, с 20.XI 2006 г. по X 2011 г. (табл. 3, рис. 6). Расчеты велись по методу, приведенному в [12].

Главное отличие этого прогноза, предварительного для Средних Курильских островов, от предыдущего заключается в следующем: вероятность возникновения нового землетрясения с $M \geq 7.7$ в участке № 7 (рис. 2, б) уменьшилась до 0.3%, что более чем в 10 раз ниже средней на 5-летний период времени (3.4-4.6%).

Одновременно, с IV 2006 до 19.XI 2006 г., возросла с 48.0 до 53.0% вероятность таких землетрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского у Южной Камчатки, в Авачинском и Кроноцком заливах (рис. 6, участки 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б; табл. 3). При этом вероятность возникновения землетрясения силой 9 баллов в районе г. Петропавловска-Камчатского увеличилась с 14.6 до 16.4%. Вероятность землетрясения силой 7-8 баллов в районе г. Петропавловска-Камчатского возросла с 33.4 до 36.6%. Эти оценки будут уточнены после первого месяца афтершоков, когда произойдет около 70% афтершоков первого года.

Карта на рис. 6 наглядно показывает, как наконец-то после более чем 100-летнего затишья эффективно заполнилась пустовавшая "сейсмическая брешь" у Средних Курильских о-вов и о. Шиашкотан, участок № 7.

По данным [12, 13, 19, 22, 24 и др.], за первые 10 дней после курило-камчатских и японских землетрясений с $M \geq 7.7$ в среднем происходит 65% от годового числа их афтершоков.

Весьма вероятно, что афтершоки, которые появятся после первых 10 дней, будут не только заполнять участок № 7 (рис. 5, б), но и распространятся на соседние участки № 6 и № 8. После этого величины A_{10} и D в них могут возрасти, если не исключить из оценок афтершоки, и величины B , (1- B) и $P(M \geq 7.7)$ станут отличаться от тех, которые предварительно указаны в табл. 3 и на рис. 6. Ввиду этого величины $P(M \geq 7.7)$ для участков № 6 и 8 помечены знаком вопроса и будут уточняться в дальнейшем. Наблюдения ближайших месяцев и лет покажут, какие изменения будут происходить в рое афтершоков этого события, очень интересного в сейсмологическом и сеймотектоническом отношении³.

5. Обсуждение результатов

В данном разделе рассматривается ряд вопросов. Сначала обратимся к прогнозу наиболее важных в прикладном отношении величин - вероятностей возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ во всех участках Курило-Камчатской дуги, - и оценке относительной опасности "сейсмических брешей", которые были получены в 2001-XI 2006 гг. по сейсмологическим данным за 1996-X 2006 гг. до Средне-

³ Эта статья была сдана в редакцию 1.XII 2006 г. Месяцем позже в восточной части области очага Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г. произошло еще одно сильнейшее землетрясение. Основные данные о нем, по сообщению ГС РАН (Обнинск), следующие: время (Москва) 13.01.2007, 07 ч 23 мин 19.4 с, координаты эпицентра 46.25° с.ш., 154.46° в.д., глубина 10 км, $M_s = 8.2$. Его эпицентр находился в глубоководном желобе. По "сценарию афтершоков" [12, 13, 19, 22, 24 и др.], сильнейший афтершок землетрясений с $M \geq 7.7$ в течение первого года после него с вероятностью 0.67 имеет магнитуду $M = 7.5-7.9$. Землетрясение 13.1 2007 г. оказалось более сильным. Его возникновение подтверждает заключительную фразу раздела 4 этой статьи (прим. авт.).

Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_S = 8.2$.

Относительная опасность "сейсмических брешей" пропорциональна величине (1-В), которая показывает вероятность того, что данный участок находится в III, заключительной стадии сейсмического цикла. В течение длительного времени для определения В использовалось выражение $V = P(A_{10}) \cdot P(D)$, где $P(A_{10})$ и $P(D)$ - вероятности появления наблюдаемых величин A_{10} и D во II, стабильной стадии сейсмического цикла. При этом принимается, что величины A_{10} и D , мало связаны между собой в больших участках сейсмогенной зоны, средняя площадь которых $11 \cdot 10^3$ км². В последние годы к параметрам A_{10} и D был добавлен параметр A_{11} , после чего для определения относительных вероятностей $P(M \geq 7.7)$ стали применяться величины $V_1 = P(A_{10}) \cdot P(D) \cdot P(A_{11})$ и $V_2 = 1/3[P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11})]$. Величины V_1 и V_2 позволяют оценивать интервал значений В в случае малой корреляции между A_{10} , D и A_{11} и в случае сильной зависимости между ними.

В табл. 4 приведены 10 оценок величин $P(M \geq 7.7)$ для "сейсмических брешей" Курило-Камчатской дуги, полученные в 2001 - XI 2006 гг. при использовании величин В, V_1 и V_2 . Указаны пятилетние интервалы времени для периода 2001 - X 2011 гг., для которых даются прогнозы, а также показано, что в этих прогнозах, составленных в 2001 - XI 2006 гг., вероятности $P(M \geq 7.7)$ в "сейсмических брешах" имели небольшой разброс: стандартные отклонения определенных величин $P(M \geq 7.7)$ для каждого участка лежат в пределах 1.3-3.3%.

В значительной мере устойчивость оценок определялась тем, что в течение 2001 - X 2006 гг. в сейсмогенной зоне Курило-Камчатской дуги не было землетрясений с $M \geq 7.7$, после которых бы изменилась карта очагов сильнейших землетрясений и "сейсмических брешей" и изменилось бы деление на участки той части сейсмогенной зоны, для которой даются прогнозы.

Два землетрясения с $M \geq 7.7$ произошли в этот период южнее и севернее полосы прогноза для Курило-Камчатской дуги.

25 сентября 2003 г. у юго-восточного побережья Хоккайдо произошло землетрясение с $M = 8.1$. Его эпицентр и область очага показаны на рис. 1, 2. Был составлен ретроспективный долгосрочный сейсмический прогноз для этого района, который показал, что в 2001-2003 гг. этот район был вторым по уровню сейсмической опасности в регионе Хоккайдо - Курильские о-ва - Камчатка [14]. 20 апреля 2006 г. в Корякском нагорье у западного побережья Берингова моря произошло Олюторское землетрясение с $M = 7.8$ (координаты эпицентра 61.06° с. ш., 167.58° в. д., глубина очага 3.5-42.0 км). Область его очага располагается на продолжении геолого-тектонических структур Камчатки, но находится в 500 км к северо-востоку от полосы прогноза для Курило-Камчатской дуги, и долгосрочные сейсмические прогнозы не составлялись для этого района.

Как было отмечено выше, из табл. 4 следует, что средние величины $P(M \geq 7.7)$, полученные тремя разными способами подсчета параметра В, мало различаются между собой. Важно, что стандартные отклонения средних значений $P(M \geq 7.7)$ невелики и лежат в пределах 1.3-3.3%. Табл. 4 подтверждает, что наибольшая опасность существует в районе г. Петропавловска-Камчатского и Южной Камчатки, где вероятности $P(M \geq 7.7)$, определенные до землетрясения 15.XI 2006 г. на следующие пять лет равнялись соответственно $16.5 \pm 2.2\%$ и $15.0 \pm 3.3\%$.

Табл. 4 показывает, что вторым по опасности районом с 2001 г. до момента землетрясения 15.XI 2006 г. устойчиво оставались Средние Курильские о-ва участки № 6-8, где в участке № 7 средняя вероятность $P(M \geq 7.7) = 10.4 \pm 1.4\%$.

Самое главное событие в Курило-Камчатской дуге в 2001-2006 гг. произошло 15.XI 2006 г., когда у Средних Курильских о-вов и о. Шиашкотан произошло верно предсказанное землетрясение с $M_w = 8.3$, $M_S = 8.2$, что считалось невозможным рядом исследователей. Эти важные событие и прогноз уже рассмотрены в разделе 3, поэтому перейдем к обсуждению других вопросов, которые мало затрагивались в разделах 1-4.

При оценке табл. 4 полезно иметь в виду, что для двух последних сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги: Шикотанского землетрясения 4.X 1994 г., $M = 8.1$, на юге Курильских островов (рис. 1, 2), и для Кроноцкого землетрясения у берегов Камчатки 5.XII 1997 г., $M = 7.8-7.9$ (рис. 1, 2) были даны верные заблаговременные долгосрочные прогнозы. В них сообщалось, что области очагов этих землетрясений были среди 2-3 наиболее вероятных мест следующих сильнейших землетрясений [17, 20, 23].

Предыдущие сильнейшие курило-камчатские землетрясения с $M \geq 7.7$, которые произошли в 1969, 1971, 1973 и 1978 гг., также располагались в предсказанных "сейсмических брешах" (рис. 2, 6), [12 и др.].

Таблица 3. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XI 2006-X 2011 гг. ($H < 80$ км), построенный после Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_s = 8.2$ с использованием параметров A_{10} , D , A_{11} , и сравнение его с прогнозом, составленным в октябре 2004 г.

Участок	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2001-2006 гг. (X 2001 г. - XI 2006 г.)					Прогноз на XI 2006 – X 2011 гг.								Прогноз на IX 2004 - IX 2009 гг.	
								$A_{10}(P \sim 0.7)$		$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	M_{MAX}	$P(M \geq 7.7)\%$	Вероятная очередность	$P(M \geq 7.7)\%$	Вероятная очередность
			Стадия	$P_1=P(A_{10})$	$P_2=P(D)$	$P_3=P(A_{11})$	$B = (P_1 \cdot P_2 \cdot P_3)$	A_{10}	$A_{10 \pm \sigma}$								
1	0 – 100	Мыс Сириха - п-ов Немуро	III	0.19	0.01	0.94	0.002	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	11.2 (5.3)	3-4 (7)	13.2	2
2	100 – 200	П-ов Немуро - о-в Зелёный	II					1.2	0.8 - 1.9	5.8	6.3	6.8		0.7 (0.5)		0.6	
3а	200 – 300	О-в Шикотан, Ю-В	II					1.2	0.8 - 1.9	5.7	6.2	6.7		0.8 (0.6)		0.7	
3б	200 – 300	О-в Шикотан, С-З	I					2.1 → 1.4	0.9 - 3.1	6.0	6.4	6.9		0.3 (0.2)		0.3	
4	300 – 450	О-в Итуруп	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		1.6 (1.4)		1.5	
5	450 – 600	Пролив Фриза - о-в Уруп	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		1.4 (1.1)		1.3	
6	600 – 750	Мыс Кастрикум - пр. Буссоль	III?	0.97	0.99	0.73	0.71	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	3.4? (7.1)	8 (6)	1.4 – 4.4	9
7	750 – 950	О-в Симушир - пр. Крузенштерна	I					1.2-3	0.8 - 4.5	6.2	6.7	7.2	8.2	0.3? (10.8)	(4)	9.4	5
8	950 - 1100	О-в Шиашкотан	III?	0.996	0.73	0.97	0.69	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	5.4? (3.2)	7 (8)	7.2	7
9	1100 - 1200	О-в Онекотан - пр. 3-й Курильский	III	0.89	0.16	0.90	0.13	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	9.8 (8.0)	5 (5)	7.7	6
10	1200 - 1350	О-в Парамушир - мыс Лопатка	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		2.0 (2.7)		1.9	
11а	1350 - 1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6 - 1.1	5.8	6.3	6.8		2.6 (3.6)		2.5	
11б	1350 - 1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.63	0.55	0.23	0.09	1.3 – 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	19.2 (17.0)	1 (2)	10.6	4
12а	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, Ю-В	II					1.2	0.8 - 1.9	5.7	6.2	6.7		2.0 (2.7)		1.9	
12б	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, С-З	III	0.24	0.72	0.19	0.03	1.2 – 3	0.8 - 4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	16.4 (19.0)	2 (1)	19.6	1
13а	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.87	0.81	0.37	0.26	1.2 – 3	0.8 - 4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	11.2 (3.3)	3-4	5.3	8
13б	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, С-З	II					2.6	1.7 - 3.9	5.9	6.4	6.9		1.6 (1.3)		1.5	
14	1850 - 1950	П-ов Кроноцкий	I					3.1 → 1.9	1.2 - 4.5	6.0	6.5	7.0		0.3 (0.2)		0.2	
15	1950 - 2050	Зал. Камчатский	III?	0.33	0.69	0.83	0.19	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	9.4 (11.6)	6 (3)	12.9	3
16	2050 - 2100	П-ов Камчатский	II					0.8	0.6 - 1.1	5.7	6.2	6.7		0.4 (0.3)		0.3	
Оценка критических значений вероятностей				0.062	0.308	0.06	0.0012							$\Sigma = 100.0$		$\Sigma = 101.5$	

Примечание Даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на XI 2006-X 2011 гг. Для всех 20 участков дуги указываются вероятные стадии сейсмического цикла. Индексом III отмечены те участки, в которых землетрясения с $M \geq 7.7$ не происходили в течение последних 80 лет и где значительна вероятность прихода заключительной, III стадии сейсмического цикла. Знаками вопроса отмечены те из участков, в которых вероятность такого события меньше. В - параметр, показывающий относительную опасность "сейсмических брешей"; A_{10} - сейсмическая активность; $P \sim 0.8, 0.5, 0.15$ - вероятности землетрясений с $M = 5.7-7.2$; M_{max} - максимальная возможная магнитуда; $P(M \geq 7.7)$ - прогнозируемые вероятности сильнейших землетрясений. Значения вероятности $P(M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их величинам на 2001-2005 гг. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6-4.2\%$. Выделены оценки вероятности сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ и их очередность.

Таблица 4. Оценки вероятностей $P(M \geq 7.7)$ сильнейших землетрясений в «сейсмических брешах» в 2001 - X 2006 гг. при параметрах B, B_1, B_2

Участок	Δ , км	Район	Стадия	$B = P(A_{10}) \cdot P(D)$						$B_1 = P(A_{10}) \cdot P(D) \cdot P(A_{11})$		$B_2 = (P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11}))/3$		Оценки P по B и B_1	
				2001-2005	IV 2004-III 2009	XI 2004-X 2009	VI 2005-V 2010	IX 2005-IX 2010	XI 2006-X 2011	IX 2005-IX 2010	IV 2004-III 2005	IX 2005-IX 2010	XI 2006-X 2011	P ср.	σP
1	0 – 100	Мыс Сириха - п-ов Немуро	III	5.7	11.1	13.2	14.4	11.4	10.7	10.3	10.1	11.0	10.4	10.9	2.1
2	100 – 200	П-ов Немуро - о-в Зелёный	II												
3а	200 – 300	О-в Шикотан, Ю-В	II												
3б	200 – 300	О-в Шикотан, С-З	I												
4	300 – 450	О-в Итуруп	II												
5	450 – 600	Пролив Фриза - о-в Уруп	II												
6	600 – 750	Мыс Кастрикум - пр. Буссоль	III?	7.7	4.4	4.4	4.4	3.4	3.2	3.1	3.1	5.0	4.7	4.4	1.3
7	750 – 950	О-в Симушир - пр. Крузенштерна	III?	11.7	11.6	9.4	9.7	10.9	12.4	7.9	10.9	8.7	9.7	10.4	1.4
8	950 - 1100	О-в Шиашкотан	III?	3.5	9.4	7.2	9.2	9.0	6.2	5.9	3.0	6.3	4.8	6.5	2.2
9	1100 - 1200	О-в Онекотан - пр. 3-й Курильский	III	9.6	8.1	7.7	4.7	10.2	9.4	9.0	8.6	7.5	6.7	8.2	1.5
10	1200 - 1350	О-в Парамушир - мыс Лопатка	II												
11а	1350 - 1550	Юг Камчатки, Ю-В	II												
11б	1350 - 1550	Юг Камчатки, С-З	III	18.3	17.1	10.6	8.7	11.5	15.3	17.1	18.2	15.3	18.2	15.0	3.3
12а	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, Ю-В	II												
12б	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, С-З	III	20.5	18.9	19.6	17.2	14.5	13.8	14.9	14.6	15.8	15.6	16.5	2.2
13а	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	3.6	4.9	5.3	5.0	10.6	6.7	10.6	10.7	9.4	9.3	7.6	2.6
13б	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, С-З	II												
14	1850 - 1950	П-ов Кроноцкий	I												
15	1950 - 2050	Зал. Камчатский	III?	12.5	5.3	12.5	10.6	9.3	8.7	8.1	8.0	7.5	7.2	9.0	2.2
16	2050 - 2100	П-ов Камчатский	II												

Примечание. Положение участков 1-16 показано на рис 2, 3. Среднее значение $P(M \geq 7.7)$ для 5-летних интервалов времени во всех участках зоны равно 3.6-4.2%.

В предыдущих разделах 1-4 рассматривались, в первую очередь, долгосрочные сейсмические прогнозы наиболее опасных явлений, землетрясений с $M \geq 7.7$. Кроме них прогнозировался на 5 лет ряд других величин и характеристик: стадия сейсмического цикла, сейсмическая активность A_{10} , магнитуды землетрясений средней силы, которые ожидалось с вероятностью 0.8, 0.5, 0.15, и другие (табл. 2, 3). В дополнение к разделам 1-4 покажем, насколько оправдывался прогноз этих величин в последние годы.

Оценки этих прогнозов делались регулярно в конце пятилетних интервалов прогноза [12, 14, 15, 16, 20, 21]. После первых 20 лет долгосрочного прогноза в 1965-1985 гг. выяснилось, что прогнозы величин A_{10} по всем участкам, дававшиеся с вероятностью 0.7, оправдались на 73%; прогнозы магнитуд M , ожидавшихся с вероятностью 0.8, оправдались в 65% случаев, а прогнозы магнитуд M , ожидавшихся с вероятностью 0.5, выполнялись в 32% случаев [15, 20, 21]. В последующие годы эти цифры мало менялись.

В табл. 5 приведены средние числа оправдавшихся прогнозов сейсмической активности $A_{10} \pm \sigma$ и землетрясений с $M = 5.7-6.1$, ожидавшихся с вероятностью $P = 0.8$ в различных участках зоны прогноза в течение пятилетних интервалов времени в 1986-1990, 1991-1995, 1996-2000 гг. по данным [15, 16, 21], а также в 2001-2005 гг. по данным настоящего исследования. Как можно видеть в табл. 5, прогнозы $A_{10} \pm \sigma$ и $M(P = 0.8)$ оправдываются в среднем более чем в половине случаев. Уменьшение числа оправдавшихся прогнозов $A_{10} \pm \sigma$ и $M(P = 0.8)$ в 2001-2005 гг. может быть вызвано неполнотой регистрации слабых землетрясений, в частности на Средних Курильских о-вах, а также отсутствием в этот период времени землетрясений с $M \geq 7.7$, которые повышают уровень сейсмичности в участках, прилегающих к их очагам.

Полезным приложением к методу долгосрочного сейсмического прогноза являются "сейсмические сценарии" или средние последовательности сильных ($M \geq 6$) форшоков и афтершоков тихоокеанских землетрясений с $M \geq 7.7$ [12, 13, 17, 19, 20, 22-24 и др.]. Такие последовательности были построены для форшоков, происходящих в течение месяца до тихоокеанских землетрясений с $M \geq 7.7$, и в течение первого года афтершоков. Эти "сейсмические сценарии" систематически применяются для оценки сейсмической обстановки при появлении землетрясений с $M \geq 6$ или роев землетрясений в "сейсмических брешах", а также для прогноза опасных афтершоков, возникающих после землетрясений с $M \geq 7.7$. "Сценарии" позволяют давать краткосрочные прогнозы опасности сильных землетрясений при возникновении в "сейсмических брешах" землетрясений с $M \geq 6$ и позволяют прогнозировать развитие последовательности сильных афтершоков землетрясений с $M \geq 7.7$ в течение года после их возникновения [12, 13, 17, 19, 20, 22-24 и др.].

Таблица 5. Среднее количество оправдавшихся пятилетних прогнозов величин A_{10} и $M(P = 0.8)$ для 18-21 участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги в 1965-2005 гг.

Годы	$A_{10} \pm \sigma$ $P = 0.7$	$M = 5.7-6.1$ $P = 0.8$	Источник
1965-1985	0.73	0.65	[15]
1986-1990	0.78	0.38	[16]
1991-1995	0.50	0.38	[16]
1996-2000	0.52	0.52	[16]
2001-2005	0.45	0.40	

Примечание. $A_{10} \pm \sigma$ - интервалы сейсмической активности, прогнозируемые на 5 лет с вероятностью $P = 0.7$; $M(P = 0.8)$ - магнитуды землетрясений с $M = 5.7-6.2$, прогнозируемые на 5 лет с вероятностью $P = 0.8$. В таблице показана доля оправдавшихся прогнозов.

Первый "сценарий" был подготовлен в 1990 г. и тогда же был передан в полном виде администрации и штабу гражданской обороны Камчатской области, которые заблаговременно готовили меры на случай разрушительных землетрясений, и строителям, сооружающим или укрепляющим сейсмостойкие здания на Камчатке [12, 19, 24]. Примеры оценок сейсмической обстановки при помощи "сейсмических сценариев" приведены в [13, 19, 22-24 и др.].

По сейсмическим сценариям давались правильные прогнозы последовательностей афтершоков Шикотанского землетрясения на Южных Курильских о-вах 13.X 1994 г., $M = 8.1$ (табл. 1, рис. 2, 6), [12, 20 и др.] и Кроноцкого землетрясения на Камчатке 5.XII 1997 г., $M = 7.9$ (табл. 1, рис. 2, 6), [12, 17, 23 и др.].

"Сценарии" использовались после землетрясения с $M = 6.5$, возникшего 24.VIII 2006 г. в участке 11б у побережья Южной Камчатки в "сейсмической брешах", где вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ в течение 5 лет равна в среднем 15% (рис. 2, табл. 2, 5). По дававшимся оценкам, вероятность того, что оно является форшоком землетрясения с $M \geq 7.7$, была около 10% в течение нескольких дней после него и существенно снизилась через 10 дней.

В 2006 г. "сейсмические сценарии" также применялись аналогичным образом дважды для прогноза сильных афтершоков ($M \geq 6$) Олюторского землетрясения 20.IV 2006 г., $M = 7.8$, и Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$ (раздел 3).

Олюторское землетрясение с магнитудой $M = 7.8$ произошло 20.IV 2006 г. вне полосы долгосрочного сейсмического прогноза, примерно в пятистах километрах от нее, его эпицентр имел координаты 61.07° с.ш. и 167.06° в.д. Так как "сейсмический сценарий" строился для всех сильнейших землетрясений тихоокеанского сейсмического пояса, он был использован для прогноза афтершокового процесса и для этого землетрясения.

Таблица 6. Сравнение количества афтершоков с $M \geq 6$ Олюторского землетрясения 20.IV 2006 г., $M = 7.8$ и Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_s = 8.2$, с количеством таких афтершоков, прогнозируемых на основе "сейсмического сценария"

Сутки	M	n, количество афтершоков		
		"сценарий афтершоков"	Олюторское землетрясение	Средне-Курильское землетрясение
2	6.0-6.4	3	3	6
	≥ 6	4-5	3	7
10	6.0-6.4	4	4	6
	≥ 6	7	4	7
30	6.0-6.4	5	5	-
	≥ 6	8	6	-
230	6.0-6.4	6	5	-
	≥ 6	10	6	-

Примечание. Приведены данные о сильных афтершоках Средне-Камчатского землетрясения 15.XI 2006 г., которые произошли в течение 10 дней после него. Развитие их последовательности будет рассматриваться в дальнейших работах.

Прогнозы последовательностей сильных афтершоков передавались в Совет Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и Камчатского филиала (КФ) Геофизической службы (ГС) РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов. Совет рассылал прогнозы в 14 адресов, включая администрацию Камчатской области, МЧС, Российский экспертный совет (РЭС) РАН.

Ожидаемое и наблюдавшиеся количества афтершоков с $M \geq 6$ для обоих названных землетрясений представлены в табл. 6.

Можно отметить совпадение результатов для афтершоков Олюторского землетрясения по диапазону магнитуд $M = 6.0-6.4$ и меньшую сумму всех афтершоков с магнитудами $M \geq 6$. Это объясняется относительно малой магнитудой главного толчка ($M = 7.8$) и, соответственно, уменьшением числа афтершоков с магнитудами $M \geq 6.5$.

Афтершоки Средне-Курильского землетрясения отличались особой интенсивностью в первые десятки минут. В течение получаса произошли пять афтершоков с $M \geq 6$, в том числе один самый сильный афтершок первых 10 дней с магнитудой $M = 6.5$. В дальнейшем интенсивность афтершокового процесса стабилизировалась и в течение первых 10 дней держалась на уровне, который дается "сейсмическим сценарием". В целом, в течение первых 10 дней произошло 7 афтершоков с $M \geq 6$, что соответствует "сейсмическому сценарию"⁴.

Можно отметить также, что перед Средне-Курильским землетрясением 15.XI 2006 г. наблюдался в течение 1.5 мес. сильный рой форшоков (рис. 4), и имела возможность краткосрочного прогноза этого землетрясения на основе "сейсмического сценария"⁴.

В 2005-2006 гг. проводилось сопоставление данных рассматриваемого метода долгосрочного сейсмического прогноза с результатами, получаемыми по другим методам долгосрочного и среднесрочного сейсмического прогнозов для Камчатки и всей Курило-Камчатской дуги, начиная с методов M8, RTL, кода-волн и др. [2, 3, 7 и др.]. Эти вопросы и состояние проблемы долгосрочного сейсмического прогноза в мире обсуждались в [10, 15], и их рассмотрение выходит за пределы данной статьи.

Заключение

1. Приведены результаты работ 2005-2006 гг. по долгосрочному сейсмическому прогнозу для Ку-

⁴ Данная статья была сдана в редакцию 1.XII 2006 г., и поэтому в табл. 6 приведены сведения только за первые 10 дней афтершоков Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г. Дальнейшее развитие этого роя афтершоков и сейсмического процесса должно рассматриваться в следующих работах. В них предстоит сопоставить развитие сейсмического процесса при трех парах сильнейших курило-камчатских землетрясений: 7.IX 1918 г., $M = 8.2$ и 8.XI 1918 г., $M = 7.9$; 3.II 1923 г., $M = 8.5$ и 24.II 1923 г., $M = 7.7$; 15.XI 2006 г., $M = 8.2$ и 13.I 2007 г., $M = 8.2$ (прим. авт.)

рило-Камчатской дуги, которые ведутся по методу, основанному на закономерностях "сейсмических брешей" и сейсмического цикла [9, 10, 12, 14, 21, 25 и др.]. Даются краткие сведения о методе и его развитии, представлены долгосрочные сейсмические прогнозы для Курило-Камчатской дуги на IV 2006-IV 2011 гг. (раздел 2), составленный в апреле 2006 г. перед Средне-Курильским землетрясением 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$, и прогноз на XI 2006-XI 2011 гг. (раздел 4), составленный 19.XI 2006 г. после этого землетрясения и учитывающий вызванные им изменения в сейсмическом процессе.

2. Как и в предыдущих работах по данному методу [12, 14 и др.], в сейсмогенной зоне Курило-Камчатской дуги выделяются очаги землетрясений с $M \geq 7.7$ последних 80 лет и "сейсмические брешы" между ними, а сейсмогенная зона делится на примерно 20 участков в зависимости от расположения названных очагов и "сейсмических брешей" (разделы 1, 2, 4). Для этих участков размерами от 50×100 до 100×200 км прогнозируются по пятилетним интервалам времени стадии сейсмического цикла, сейсмическая активность A_{10} , магнитуды землетрясений, ожидаемых с вероятностью 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные возможные магнитуды, вероятности появления сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$, наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ ("сейсмические брешы") и относительная опасность "сейсмических брешей".

Важной частью прогноза является оценка относительной опасности "сейсмических брешей" $P(M \geq 7.7)$. Средняя повторяемость землетрясений с $M \geq 7.7$ во всей Курило-Камчатской дуге близка к 5 годам, средний интервал между ними равнялся 5.6 ± 4.4 года. Рассчитанные оценки вероятности возникновения следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ в разных участках сейсмогенной зоны рассматривались как несовместимые события, сумма вероятностей которых равна 1. Оценки относятся к следующим 5 годам. В 1952-2006 гг. среди 11 пятилетних интервалов между землетрясениями с $M \geq 7.7$ в 9 случаях из 11 происходили 1-2 землетрясения с $M \geq 7.7$, и принятое условие выполнялось более чем в 0.8 случаев (разделы 1, 2, 4, 5).

В 1965-2000 гг. прогнозы оправдывались в 0.8-0.9 случаев [12 и др.]. В течение последних 12 лет верно предсказывались места Шикотанского землетрясения 13.X 1994 г., $M = 8.1$ [20] и Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.9$ [17, 23]. Новое подтверждение принесло Средне-Курильское землетрясение 15.XI 2006 г., $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$ (раздел 3).

3. С начала детальных сейсмологических исследований по рассматриваемому методу в 1965 г. крупная "сейсмическая брешь" в районе Средних Курильских о-вов считалась одним из вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ на Курило-Камчатской дуге [9, 12 и др.]. Ряд исследователей считал, что здесь невозможны землетрясения с магнитудами более 7.5 ± 0.2 . Район Средних Курильских о-вов и о. Шишкотан выделялся нами и далее в течение длительного времени как одна из наиболее опасных "сейсмических брешей" [12, 14, 15, 16 и др.]. Последние такие прогнозы давались дважды в 2006 г. - в IV 2006 г. и в X 2006 г. накануне землетрясения (рис. 2, 6, раздел 3).

Очаг землетрясения 15.XI 2006 г. очень точно заполнил предсказанную "сейсмическую брешь".

4. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги, составленный на IV 2006-IV 2011 гг. (раздел 2), подтвердил, что наибольшая опасность имела в районе г. Петропавловск-Камчатского, где суммарная вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$ в шести прилегающих участках (рис. 2, 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б; табл. 2), которое может иметь силу 7-9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, достигла 48% (раздел 2).

Вторым по уровню сейсмической опасности был район Средних Курильских о-вов и о-ва Онекотан (участки 6-9 на рис. 2, 4), в которых суммарная вероятность $P(M \geq 7.7)$ достигла 26.7% (раздел 2).

Этот прогноз подтвердился, когда здесь произошло Средне-Курильское землетрясение 15.XI 2006 г. с $M_w = 8.3$, $M_s = 8.2$ (раздел 3).

После него был составлен обновленный долгосрочный сейсмический прогноз на XI 2006-XI 2011 гг. (раздел 4). Он может даваться более уверенно для района Средних Курильских о-вов после первого года афтершоков землетрясения 15.XI 2006 г. Возросла до 53% вероятность землетрясения силой 7-9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский (раздел 4). Вероятность землетрясения в Авачинском заливе, которое может иметь силу 9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, равна 16.5% (раздел 4, 5, табл. 3, рис. 6)⁵.

Следующими по степени опасности являются три района: п-в Немуро, участок 1 (табл. 3, рис. 6), где $P(M \geq 7.7) = 11.2\%$; Камчатский залив на Камчатке, участок 15 (табл. 3, рис. 6), где $P(M \geq 7.7) = 9.4\%$, а также район о-ва Онекотан, находящийся северо-восточнее очага землетрясения 15.XI 2006 г., участок 9 (табл. 3, рис. 6), где $P(M \geq 7.7) = 9.8\%$.

В то же время в половине участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ равна средней (3.6-4.2%) или значительно (до 10-15 раз) ниже нее.

⁵ Землетрясение с $M_s = 8.2$, произошедшее 13.I 2007 г. в области очага Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., показало, что возможны уточнения долгосрочного сейсмического прогноза для Средних Курильских о-вов. Однако сразу после него не возникло оснований для существенных изменений названных вероятностей землетрясений силой 7-9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском (прим. авт.)

5. Долгосрочные сейсмические прогнозы для Курило-Камчатской дуги 1986-2006 гг. служили обоснованием для разработки шести правительственных распоряжений и постановлений о подготовке Камчатской области к сильным землетрясениям; сведения о них приведены в [12]. По долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги на IV 2006-IV 2011 гг. вероятность землетрясений силой 7-9 баллов на этот период в главном городе региона, Петропавловске-Камчатском, достигала 48% (раздел 2). Этот прогноз стал обоснованием новых поручений и распоряжений Президента и Правительства Российской Федерации о неотложных мерах по сейсмобезопасности, предотвращению ущерба, сейсмоусилению зданий и сооружений в Камчатской области.

6. Построенный долгосрочный сейсмический прогноз одновременно является долгосрочным прогнозом вероятности цунами в различных районах Курило-Камчатской дуги.

7. Приведенные результаты подтверждают, что рассматриваемый метод долгосрочного сейсмического прогноза может применяться в других регионах мира, имеющих сходное строение и протяженные сейсмогенные зоны.

Работа выполнена при поддержке проекта ДВО РАН № 06-1-П16-068 "Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: продолжение прогноза катастрофических землетрясений, развитие метода и применение в других регионах мира", Направление 1 "Сейсмические процессы и катастрофы" Программы № 16 фундаментальных исследований Президиума РАН "Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы".

Список литературы

1. Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР в 1911-1957 гг. М.: Изд. АН СССР, 1962. 337 с.
2. Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышенной вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С. 48-58.
3. Матвиенко Ю.Д. Применение метода М8 на Камчатке: успешный заблаговременный прогноз землетрясения 5 декабря 1997 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 27-36.
4. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
5. Рейснер Г.И., Рогожин Е.А. Сеймотектоника и геодинамика переходных зон на примере Курильского региона // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 42-53.
6. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1965. 511 с.
7. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
8. Тараканов Р.З., Левый Н.В., Ким Ч.У. Сейсмичность Курильского региона // Сейсмическое районирование Курильских островов, Приморья и Приамурья. Владивосток: 1977. С. 27-35.
9. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. С. 66-93.
10. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121-150.
11. Федотов С.А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
12. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
13. Федотов С.А., Потапова О.В., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Последовательность опасных афтершоков ($M \geq 6$) при сильнейших землетрясениях ($M \geq 7.7$) Курило-Камчатской дуги и сходных структур // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 54-61.
14. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2004-2008 гг. и ретроспективный прогноз Хоккайдского землетрясения 25 сентября 2003 г., $M = 8.1$ // Вулканология и сейсмология. 2004. № 5. С. 3-32.
15. Федотов С.А., Чернышев С.Д. 20 лет долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1981-1985 гг., в целом за 1965-1985 гг. и прогноз на 1986-1990 гг. // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 93-109.
16. Федотов С.А., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1986-2000 гг., развитие метода и прогноз на 2001-2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 3-24.
17. Федотов С.А., Чернышев С.Д., Матвиенко Ю.Д., Жаринов Н.А. Прогноз Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M = 7.8-7.9$, Камчатка и его сильных афтершоков, $M \geq 6$ // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 3-16.
18. Федотов С.А., Чернышев С.Д., Чернышева Г.В., Викулин А.В. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7 \frac{3}{4}$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52-67.
19. Федотов С.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Оценка сейсмической опасности землетрясений с $M \geq 6$, сопровождающих сильнейшие ($M = 8$) тихоокеанские землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 3-12.
20. Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В., Потапова О.В. Долгосрочный сейсмический прогноз и развитие очага Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. // Федеральная служба сейсмологических

наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Экстренный выпуск. М.: ФССНПЗ, 1994. С. 56-67.

21. *Fedotov S.A., Chernyshev S.D.* Twenty Years of Long- Term Seismic Prediction for the Kuril-Kamchatka Arc: Reliability in 1981-1985, 1965-1985 and Prediction for 1986-1992 // *Volcanology and Seismology*. 1990. V. 9. № 6. P. 956-981. (Translation of the Russian journal *Vulcanologia i Seismologia*. 1987. № 6. P. 93-109).
22. *Fedotov S.A., Potapova O.V., Chernysheva G.V., Shumilina L.S.* Hazards from $M \geq 6$ Aftershocks of Great earthquakes ($M \geq 7.7$) in the Kuril-Kamchatka and Japan Island Arcs. // *Volcanology and Seismology*. 1998. V. 20. № 1. P. 65-72. (Translation of the Russian journal *Vulcanologia i Seismologia*. 1998. № 1. P. 54-61).
23. *Fedotov S.A., Chernyshev S.D.; Matvienko Yu.D., Zharinov N.A.* The Forecast of the December 5, 1997, Magnitude 7.8-7.9 Kronotsky Earthquake, Kamchatka, and Its $M \geq 6$ Aftershocks // *Volcanology and Seismology*. 1999. V. 20. № 6. P. 597-613 (Translation of the Russian journal *Vulcanologia i Seismologia*. 1998. № 6. P. 3-16).
24. *Fedotov S.A., Chernysheva G.V., Shumilina L.S.* Sequence of $M \geq 6$ Foreshocks and Aftershocks of Large Pacific Earthquakes ($M = 8$) and its Danger // *Volcanology and Seismology*. 1994. V. 15. № 6. P. 637-648. (Translation of the Russian Journal *Vulcanologia i Seismologia*. 1993. № 6. P. 3-12).
25. *Fedotov S.A., Chernyshev S.D., Chernysheva G.V.* The Improved Determination of the Source Boundaries for Earthquakes of $M \geq 7 \frac{3}{4}$, of Properties of Seismic Cycle, and of Long-Term Seismic Prediction for the Kuril-Kamchatka Arc // *Earthquake Prediction Research*. 1982. V. 1. P. 153-171.