

## II

### Предвестники и процессы подготовки сильных землетрясений

УДК 557.341

#### ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА 2004 – 2008 гг. И РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ХОККАЙДСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 25 СЕНТЯБРЯ 2003 г., $M=8.1$

С. А. Федотов, А. В. Соломатин, С. Д. Чернышев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйна, 9.  
Факс: (41522)54723; e-mail: fedotov@kcs.iks.ru, volcan@kcs.iks.ru*

*Аннотация.* Статья посвящена продолжению работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги и сходных структур, основанному на закономерностях «сейсмических брешей» и сейсмического цикла. Дается долгосрочный сейсмический прогноз для сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги на последующие пять лет, 2004 – 2008 гг. Наиболее вероятным местом следующего землетрясения с  $M \geq 7.7$  является район Авачинского залива и г. Петропавловска-Камчатского.

25 сентября 2003 г. у юго-восточного побережья о-ва Хоккайдо около южного края названной области прогноза произошло землетрясение с  $M_s=8.1$ . Построен долгосрочный сейсмический прогноз для о-ва Хоккайдо на 2001 – 2005 гг. Ретроспективный прогноз показал, что район этого землетрясения в 2001 г. был вторым по величине вероятности землетрясения с  $M \geq 7.7$  среди участков Тихоокеанской сейсмогенной зоны, находящихся у Камчатки, Курильских островов и о-ва Хоккайдо.

Обсуждаются результаты успешного применения метода в 1965 – 2003 гг., его развитие, сочетание с другими методами, его использование для оценки и уменьшения сейсмического риска, возможности применения в других регионах мира.

#### LONG-TERM EARTHQUAKE PREDICTION FOR THE KURIL-KAMCHATKA ARC FOR 2004-2008 AND RETROSPECTIVE PREDICTION FOR SEPTEMBER 25, 2003 HOKKAIDO EARTHQUAKE, $M = 8.1$

S. A. Fedotov, A. V. Solomatin, S. D. Chernyshev

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

This study is devoted to the continuation of the works on the long-term earthquake prediction method for the Kuril-Kamchatka arc based on laws of the “seismic gaps” and seismic cycle. The long-term earthquake prediction is provided for the seismogenic zone of the Kuril-Kamchatka arc for the five years, 2004 - 2008. The most probable place of the following  $M \geq 7.7$  earthquake is Avachinsky gulf and the city of Petropavlovsk-Kamchatsky area.

The earthquake  $M_s=8.1$  took place at September 25, 2003 off-shore the south-eastern coast of Hokkaido, near the southern edge of the named prediction area. The long-term earthquake prediction is given for Hokkaido for 2001-2005. The retrospective prediction has shown, that the area of this earthquake was in 2001 the second probable place of the next earthquake  $M \geq 7.7$  in Pacific seismogenic zone located near Kamchatka, the Kuril islands and Hokkaido.

The results of the method successful application in 1965-2003, its development and combination with the other methods, its use for seismic risk estimation and reduction, the application opportunities in the other regions of world are discussed.

## **Введение**

Долгосрочный сейсмический прогноз – одно из самых важных направлений исследований и работ по оценке сейсмической опасности. Курило-Камчатская дуга является наиболее сейсмичным регионом России. Сейсмичность достигает здесь высшего 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 [12, 13, 14 и др.]. Метод непрерывно применяется с 1965 г., совершенствуясь со временем. Результаты, полученные в 1965 – 2000 гг., и описание метода по его состоянию на 2002 г. приведены в обзорной работе [19]. На основании данных, полученных этим методом, в 1986 – 1991 и 2001 гг. были приняты несколько правительственных постановлений и решений о заблаговременной подготовке Камчатки к сильным землетрясениям.

В настоящее время по этому методу прогнозируется ряд характеристик сейсмичности Курило-Камчатской дуги на следующие пять лет. Выделяются вероятные места следующих сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  («сейсмические бреши»); к ним относятся участки сейсмогенной зоны, в которых таких землетрясений не было в течение последних 80 лет. Наиболее активная полоса сейсмогенной зоны 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, относительная опасность «сейсмических брешей», сейсмическая активность  $A_{10}$  (число слабых землетрясений энергетического класса  $K_s=10$  или  $M=3.2$  в год на площади  $10^3$  км<sup>2</sup>), магнитуды землетрясений, ожидающихся с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные магнитуды землетрясений и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  [19]. 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 (алгоритм M8 и др.) [18]. Долгосрочный сейсмический прогноз на 2001 – 2005 гг. приведен в работе [19].

В первом разделе данной работы дается прогноз на пять лет, начиная с апреля 2004 г., на 04.2004 – 03.2009 гг. или 2004 – 2008 гг. Методика дополнена тем, что для Камчатки разделение на участки прогноза делается в двух вариантах и что строятся карты прогностического параметра В, по которому оценивается относительная опасность «сейсмических брешей». Это было сделано, в первую очередь, для того, чтобы уточнить вероятность возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  в районе г. Петропавловска-Камчатского, где находится большинство населения Камчатки и Курильских островов.

Долгосрочные сейсмические прогнозы по данному методу составлялись иногда, начиная с 1965 г., также для Северо-Восточной Японии. Южный край полосы в сейсмогенной зоне Курило-Камчатской дуги длиной 2100 км, для которой даются прогнозы, находится вблизи п-ва Немуро на восточном побережье Хоккайдо. 25.09.2003 г. у побережья о. Хоккайдо около этого края полосы прогноза произошло землетрясение с  $M_S=8.1$ . Оно было самым сильным землетрясением Камчатки, Курильских островов и Хоккайдо после Кроноцкого землетрясения на Камчатке 5.12.1997 г.,  $M=7.8-7.9$ . Во втором разделе работы приводится ретроспективный долгосрочный сейсмический прогноз по нашему методу для о. Хоккайдо на 2001 – 2005 гг. и рассматривается вопрос о том, в какой мере это землетрясение могло быть предсказано.

В третьем разделе работы обсуждаются полученные результаты, возможности дальнейшего развития метода, применения его в других регионах мира, использование для оценки сейсмического риска.

### 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2004 – 2008 гг.

Применяемые метод долгосрочного сейсмического прогноза и способы расчета его параметров приведены в [19]. В данном разделе даются прогнозы на пятилетие 04.2004 – 03.2009 гг. или 2004 – 2008 гг.

На рис. 1 помещена карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на 2004 – 2008 гг. На ней нанесены области очагов произошедших землетрясений с  $M \geq 7.7$ , вероятные места следующих землетрясений с  $M \geq 7.7$  («сейсмические бреши»), в которых таких землетрясений не было в течение последних 80 лет, границы 20 участков сейсмогенной зоны, для которых даются прогнозы. Указаны вероятности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  во всех 20 участках.

При составлении прогноза для каждого участка определяется ряд следующих параметров. Нормированное количество слабых землетрясений  $A_{10}$  – число землетрясений энергетического класса  $K_S=10$ ,  $M=3.2$  в год на площади  $10^3$  км<sup>2</sup>; шкала  $K_S$  дана в [15]. Параметр  $B=P(A_{10}) \cdot P(D)$ , показывающий относительную опасность «сейсмических брешей». Относительная величина сброшенной сейсмической энергии  $D$ . Величина  $D$  задается соотношением  $D(t)=E_2(t)/E_1$ , где  $E_2(t)$ , Дж/10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>\*год – нормированная величина сейсмической энергии, выделившейся в рассматриваемом участке за время  $t$ , а  $E_1$ , Дж/10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>\*год – средняя нормированная величина сейсмической энергии, выделяющейся в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне.  $P(A_{10})$  – вероятность того, что во время II стадии сейсмического цикла величина  $A_{10}$  окажется больше наблюдаемой,  $P(D)$  – аналогичная вероятность для величины  $D$ . Величины  $P(A_{10})$  и  $P(D)$  определяются тем, что в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне в течение II стадии сейсмического цикла среднее значение  $A_{10}=1.25$ , стандартное отклонение  $\sigma \lg A_{10}=\pm 0.18$ , а среднее значение  $D=0.023$ , стандартное отклонение  $\sigma \lg D=\pm 0.72$  [16, 19 и др.].

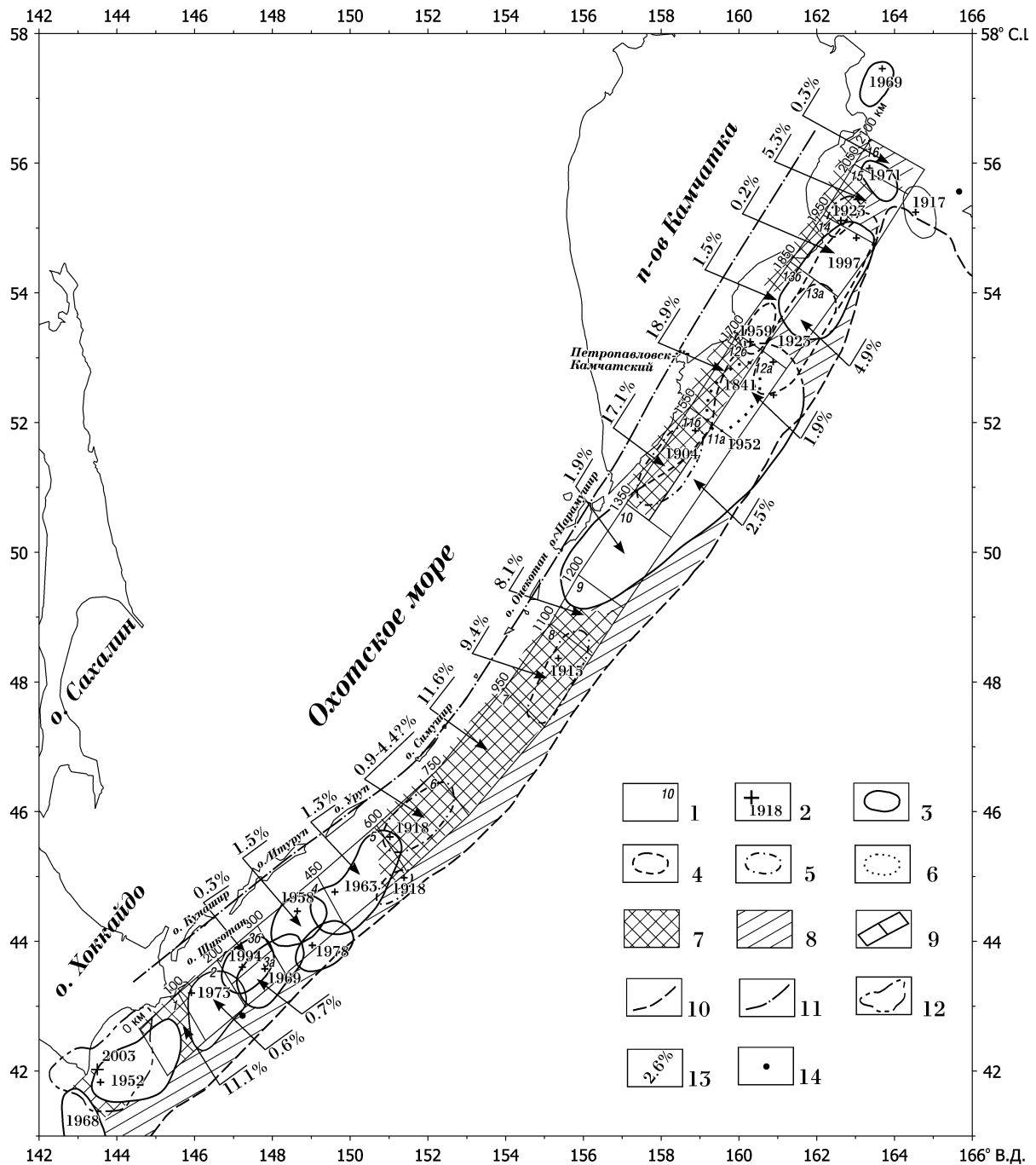
Данные о землетрясениях Камчатки и Курильских островов за предшествующие пять лет, 1999 – 04.2003 г., брались из оперативных каталогов, размещенных на сайте Геофизической службы РАН (<ftp://ftp.gsras.ru>). Определение значений  $A_{10}$ ,  $E$ ,  $D$  и  $B$  велось по принятой методике [16, 19]. Имеется большое количество соотношений между энергетическими классами и различными магнитудами землетрясений Камчатки и Курильских островов [1, 2, 4, 15]. В данной работе при расчетах в районе Курило-Камчатской дуги использовались следующие соотношения, которые позволяют сохранить однородность многолетнего ряда величин:

$$K_S = \lg E, \text{ Дж}, \quad (1)$$

$$K_S = 1.5 \cdot M + 4.6, \quad (2)$$

$$K_S = K_C + 0.6, \quad (3)$$

где  $K_S = K_{S1.2}^{\Phi 68}$  – энергетический класс землетрясений [15], который дается в



**Рис. 1.** Карта очагов курило-камчатских землетрясений 1904 – 2003 гг. с  $M \geq 7.7$ ,  $H=0-80$  км и вероятностей возникновения таких землетрясений в 2004 – 2008 гг. во всех участках полосы прогноза.

1 - номер участка; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с  $M \geq 7.7$  и их даты; 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 - предполагаемая 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 - предварительное определение границы очага землетрясения 25.09.2003 г.,  $M=8.1$ ; 13 - вероятности землетрясений  $M \geq 7.7$  на период 2004 - 2008 гг. по участкам прогноза; 14 - эпицентры землетрясений с  $6.9 < M < 7.7$ , произошедших в 04.1999 - 03.2004 гг.

камчатском региональном каталоге,  $M=M_{LH} \approx M_S$ ,  $K_C = K_{S0.7}^{C67}$  – энергетический класс землетрясений [11], используемый в региональном каталоге для Курильских островов.

В табл. 1 приведены величины вероятностей возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  в 2004 – 2008 гг. в каждом из 20 выделенных участков, которые определяются временем  $t_H$ , прошедшим в каждом из таких участков с момента последнего землетрясения с  $M \geq 7.7$ . По инструментальным и историческим данным, средняя длительность сейсмического цикла или промежуток времени между двумя последовательными землетрясениями с  $M \geq 7.7$  в одном месте распределяются по нормальному закону:  $T=140 \pm 60$  лет или  $T=120 \pm 50$  лет [19]. По этому соотношению определяется величина вероятности возникновения землетрясения с  $M \geq 7.7$  в течение следующих 5 лет:  $P_1(t_H+5)$ . Величина  $P_2$  – условная вероятность, учитывающая то обстоятельство, что землетрясение еще не произошло до момента  $t_H$ .  $P_2 = P_1(t_H+5) / [1 - P_1(t_H)]$ , где  $P_1(t_H)$  – вероятность возникновения землетрясения в интервале времени от  $t_0$  до  $t_H$ , где  $t_0$  – время последнего землетрясения с  $M \geq 7.7$ . Величина, учитывающая размеры участка,  $P_3 = P_2 * L / 150$ , где  $L$ , км – длина участка.

В начале 2004 г. в 11 участках из 20 интервал времени  $t_H$  с момента последнего землетрясения был меньше 80 лет. Сумма вероятностей землетрясений с  $M \geq 7.7$  в них на 2004 – 2008 гг. имеет следующее значение:  $\Sigma P_3(M \geq 7.7) = 9.2\%$  при  $T=140 \pm 60$  лет и  $\Sigma P_3^1(M \geq 7.7) = 12.7\%$  при  $T=120 \pm 50$  лет (табл. 1).

Средняя величина промежутков времени  $t$  между последующими землетрясениями с  $M \geq 7.7$  в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне равна 5 годам и с вероятностью 0.8 заключена в интервале 3.4 – 8.0 лет [19]. Поэтому при последующих оценках принимается, что вероятность возникновения землетрясения с  $M \geq 7.7$  в течение следующих 5 лет равна 100% и что вероятность возникновения землетрясения с  $M \geq 7.7$  в остальных участках из 20, в 9 «сейсмических брешах», равна  $1 - \Sigma P_3(M \geq 7.7)$  или  $1 - \Sigma P_3^1(M \geq 7.7)$ , т.е. 91.8% или 87.3%, в среднем 89.6%.

Принимается, что вероятность возникновения землетрясения с  $M \geq 7.7$  в «сейсмических брешах» пропорциональна величине  $1 - B$ , где  $B = P(A_{10}) * P(D)$ ;  $P(A_{10})$  – вероятность превышения на II стадии сейсмического цикла той величины сейсмической активности  $A_{10}$ , которая наблюдалась в течение предшествующих 5 лет, а  $P(D)$  – аналогичная величина для выделившейся сейсмической энергии [19]. Вероятности  $P(M \geq 7.7)$  для 9 «сейсмических брешей» на 2004 – 2008 гг., рассчитанные таким образом, приведены в табл. 2.

В табл. 3 объединены данные табл. 1, 2 и прогнозы других характеристик сейсмичности на 2004 – 2008 гг. Для всех 20 участков указываются вероятные стадии сейсмического цикла. По времени  $t_H$  и графику сейсмического цикла  $A_{10}(t)$  прогнозируется количество слабых землетрясений  $A_{10}$  и  $A_{10} \pm \sigma$ .

По времени  $t_H$  и графику  $D(t)$  для сейсмического цикла прогнозируются землетрясения с  $M=5.7 \div 7.2$ , которые ожидаются с вероятностями  $P \sim 0.8, 0.5, 0.15$ . Указываются максимальные возможные магнитуды  $M_{max}$ , величина которых зависит от размера участков.

В последних столбцах указываются вероятности землетрясений с  $M \geq 7.7$  для всех участков, спокойных и «сейсмических брешей» и относительная опасность «сейсмических брешей», сопоставляются величины в прогнозах на 2001 – 2005 гг. [19] и на 2004 – 2008 гг.

Как можно видеть в табл. 3, наиболее высокая вероятность сохраняется для Авачинского залива (участок 126), 18.9% и Южной Камчатки (участок 116), 17.1%. Сильнейшие землетрясения в этих участках могут вызвать самые тяжелые последствия в г. Петропавловске-Камчатском и его окрестностях. Для оценки этих значений долгосрочный сейсмический прогноз для Камчатки на 2004 – 2008 гг. был выполнен также в другом варианте – с построением карт параметров  $A_{10}$ ,  $D$  и  $B$  по новым программам и при отличающемся разделении сейсмической зоны на участки (рис. 2, табл. 4).

Рост величин  $A_{10}$  и  $D$  на III заключительной стадии сейсмического цикла может

Таблица 1. Вероятности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  в 2004-2008 гг. в участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны при распределении этой вероятности в течение сейсмического цикла по нормальному закону.

| Учас-<br>ток<br>№ | Район                                  | $t_0$ | $t_n$ | L,<br>км | T=140 ± 60 лет         |                  |                  | T=120 ± 50 лет    |                   |                   | P <sub>3</sub> - P' <sub>3</sub> % |
|-------------------|--|-------|-------|----------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------------|
|                   |  |       |       |          | P <sub>1</sub> %       | P <sub>2</sub> % | P <sub>3</sub> % | P' <sub>1</sub> % | P' <sub>2</sub> % | P' <sub>3</sub> % |                                    |
| 1                 | Мыс Сириха - п-ов Немуро               | 1952? | 51    | 100      | 1.21                   | 1.30             | 0.87             | 1.69              | 1.85              | 1.24              | 0.9 - 1.22 (0.7 - 1.1?)            |
| 2                 | П-ов Немуро - о. Зелёный               | 1973  | 30    | 100      | 0.69                   | 0.71             | 0.48             | 0.89              | 0.93              | 0.62              | 0.5 - 0.6 (0.4 - 0.5)              |
| 3а                | О. Шикотан, Ю-В                        | 1969  | 34    | 100      | 0.77                   | 0.81             | 0.54             | 1.02              | 1.07              | 0.71              | 0.5 - 0.7 (0.5 - 0.6)              |
| 3б                | О. Шикотан, С-З                        | 1994  | 9     | 100      | 0.35                   | 0.35             | 0.24             | 0.40              | 0.40              | 0.27              | 0.2 - 0.3 (0.2)                    |
| 4                 | О. Итуруп                              | 1958  | 45    | 150      | 1.04                   | 1.10             | 1.10             | 1.44              | 1.54              | 1.54              | 1.1 - 1.5 (1.0 - 1.4)              |
| 5                 | Пролив Фриза - о. Уруп                 | 1963  | 40    | 150      | 0.91                   | 0.96             | 0.96             | 1.24              | 1.31              | 1.31              | 1.0 - 1.3 (0.9 - 1.1)              |
| 6                 | Мыс Кастрикум - пр. Буссоль            | 1918  | 85    | 150      | 2.30                   | 2.82             | 2.82             | 3.27              | 4.35              | 4.35              | 2.8 - 4.4 (2.8 - 4.0)              |
| 7                 | О. Симушир - пр. Крузенштерна          | 1780? | 223   | 200      | 1.18                   | 14.57            | 19.42            | 0.41              | 22.03             | 29.38             | 19.4 - 29.4? (22.1 - 28.6?)        |
| 8                 | О. Шикотан                             | 1915  | 88    | 150      | 2.40                   | 2.99             | 2.99             | 3.39              | 4.63              | 4.63              | 3.0 - 4.6 (3.0 - 4.3)              |
| 9                 | О. Онекотан - пр. 3-й Курильский       | ?     | ?     | 100      |                        |                  |                  |                   |                   |                   |                                    |
| 10                | О. Парамушир - мыс Лопатка             | 1952  | 51    | 150      | 1.21                   | 1.30             | 1.30             | 1.69              | 1.85              | 1.85              | 1.3 - 1.9 (1.1 - 2.7?)             |
| 11а               | Юг Камчатки, Ю-В                       | 1952  | 51    | 200      | 1.21                   | 1.30             | 1.73             | 1.69              | 1.85              | 2.47              | 1.7 - 2.5 (1.5 - 3.6?)             |
| 11б               | Юг Камчатки, С-З                       | 1904  | 99    | 200      | 2.73                   | 3.66             | 4.88             | 3.75              | 5.72              | 7.63              | 4.9 - 7.6 (4.4 - 7.8)              |
| 12а               | Зал. Аванчинский - п-ов Шипунский, Ю-В | 1952  | 51    | 150      | 1.21                   | 1.30             | 1.30             | 1.69              | 1.85              | 1.85              | 1.3 - 1.9 (1.1 - 2.7?)             |
| 12б               | Зал. Аванчинский - п-ов Шипунский, С-З | 1841? | 162   | 150      | 3.04                   | 8.66             | 8.66             | 2.64              | 13.53             | 13.53             | 8.7 - 13.5? (8.0 - 13.4?)          |
| 13а               | Залив Кроноцкий, Ю-В                   | 1923  | 80    | 150      | 2.13                   | 2.55             | 2.55             | 3.06              | 3.91              | 3.91              | 2.5 - 3.9 (2.7 - 3.6)              |
| 13б               | Залив Кроноцкий, С-З                   | 1959  | 44    | 150      | 1.01                   | 1.07             | 1.07             | 1.40              | 1.50              | 1.50              | 1.1 - 1.5 (0.9 - 1.3)              |
| 14                | П-ов Кроноцкий                         | 1997  | 6     | 100      | 0.31                   | 0.32             | 0.21             | 0.35              | 0.35              | 0.24              | 0.2 (0.2)                          |
| 15                | Залив Камчатский                       | ?     | ?     | 100      |                        |                  |                  |                   |                   |                   |                                    |
| 16                | П-ов Камчатский                        | 1971  | 32    | 50       | 0.73                   | 0.76             | 0.25             | 0.96              | 0.998             | 0.33              | 0.3 (0.2 - 0.3)                    |
|                   |  |       |       |          | 9.43                   | 9.98             | 9.175            | 12.76             | 13.66             | 12.70             |                                    |
|                   |  |       |       |          | $\Sigma P(t_0 > 1923)$ |                  |                  |                   |                   |                   |                                    |

Примечание. Принятые номера участков см. на рис. 1;  $t_0$  - год возникновения последнего землетрясения с  $M \geq 7.7$ ;  $t_n$  - время, прошедшее с начала цикла, 2003- $t_0$  лет; L, км - длина участка вдоль Курило-Камчатской дуги; T - средний период повторения землетрясения с  $M \geq 7.7$  в одном месте; P<sub>1</sub> - вероятность землетрясения с  $M \geq 7.7$  в период времени  $t_n + 5$  лет (2004-2008 гг.), при нормальном распределении P<sub>1</sub> в течение цикла длительностью 140±60 лет; P<sub>2</sub> - условная вероятность P<sub>1</sub>, учитывающая то обстоятельство, что в течение времени  $t_0 - t_n$  землетрясение с  $M \geq 7.7$  еще не произошло; P<sub>3</sub> - величина P<sub>2</sub> \* L/150, учитывающая относительные размеры участков; P'<sub>1</sub>, P'<sub>2</sub>, и P'<sub>3</sub> - аналогичные величины для цикла T=120±50 лет; P<sub>3</sub>% - P<sub>3</sub> - интервалы значений P<sub>3</sub> для 2004 - 2008 гг., полученные для сейсмических циклов продолжительностью 140±60 и 120±50 лет;  $\Sigma P(t_0 > 1923)$  - суммы вероятностей для тех 11 участков из 20, в которых землетрясения с  $M \geq 7.7$  происходили в течение последних 80 лет, 1924 - III. 2004 гг. Значения вероятности P<sub>3</sub> - P'<sub>3</sub>% в скобках соответствуют их величинам на 2001-2005 гг., [19].

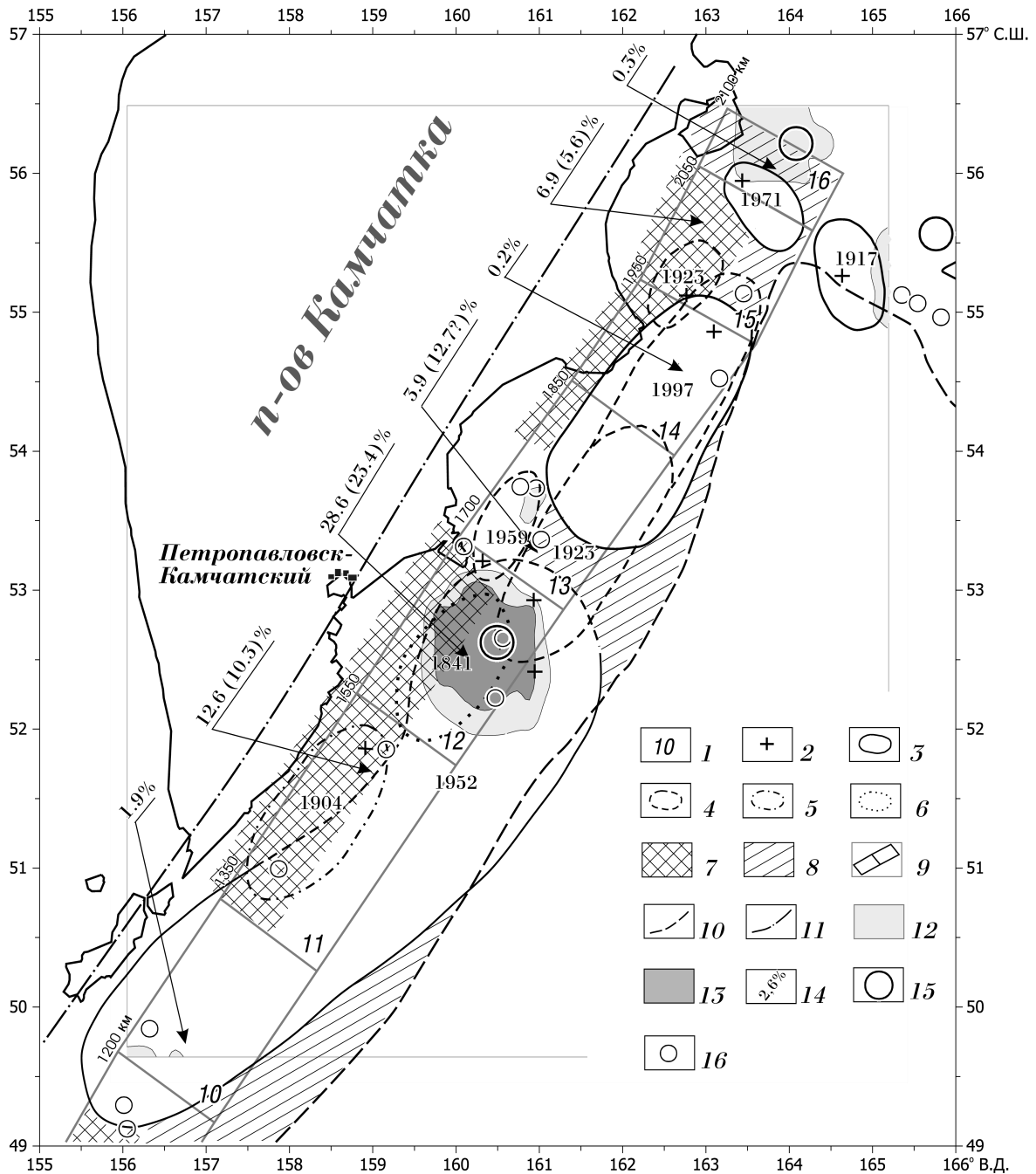
Таблица 2. Вероятности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  в 2004–2008 гг. в участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, проходящих III стадию сейсмического цикла, рассчитано с учетом параметра В.

| Участок № | Δ, км       | Район                                 | L, км | t <sub>0</sub> | Стадия цикла | 1 - В | P <sub>3</sub> % | Вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ P % |                  |
|-----------|-------------|---------------------------------------|-------|----------------|--------------|-------|------------------|--|------------------|
|           |             |                                       |       |                |              |       |                  | Без учета L                                  | С учетом L       |
| 1         | 0 - 100     | Мыс Сириха - п-ов Немуро              | 100   | 1952?          | III?         | 0.75  | 0.9 - 1.2?       | 15.7 (5.7)                                   | 11.1 (3.9)       |
| 2         | 100 - 200   | П-ов Немуро - о. Зелёный              | 100   | 1973           | II           |       | 0.5 - 0.6        |  |                  |
| 3а        | 200 - 300   | О. Шикотан, Ю-В                       | 100   | 1969           | II           |       | 0.5 - 0.7        |  |                  |
| 3б        | 200 - 300   | О. Шикотан, С-З                       | 100   | 1994           | I            |       | 0.2 - 0.3        |  |                  |
| 4         | 300 - 450   | О. Итуруп                             | 150   | 1958           | II           |       | 1.1 - 1.5        |  |                  |
| 5         | 450 - 600   | Пролив Фриза - о. Уруп                | 150   | 1963           | II           |       | 1.0 - 1.3        |  |                  |
| 6         | 600 - 750   | Мыс Кастрикум - пр. Буссоль           | 150   | 1918           | III?         | 0.04  | 2.8 - 4.4        | 0.9 - 4.4? (7.6)                             | 0.9 - 4.4? (7.7) |
| 7         | 750 - 950   | О. Сямлуир - пр. Крузеншгерна         | 200   | 1780?          | III?         | 0.39  | 19.4 - 29.4      | 8.2 (8.6)                                    | 11.6 (11.7)      |
| 8         | 950 - 1100  | О. Шиапкотан                          | 150   | 1915           | III?         | 0.42  | 3.0 - 4.6        | 8.9 (3.5)                                    | 9.4 (3.5)        |
| 9         | 1100 - 1200 | О. Онекотан - пр. 3-й Курильский      | 100   | ?              | III?         | 0.55  |                  | 11.5 (8.6)                                   | 8.1 (5.8)        |
| 10        | 1200 - 1350 | О. Парамушир - мыс Лопатка            | 150   | 1952           | II           |       | 1.3 - 1.9        |  |                  |
| 11а       | 1350 - 1550 | Юг Камчатки, Ю-В                      | 200   | 1952           | II           |       | 1.7 - 2.5        |  |                  |
| 11б       | 1350 - 1550 | Юг Камчатки, С-З                      | 200   | 1904           | III          | 0.58  | 4.9 - 7.6        | 12.1 (13.5)                                  | 17.1 (18.3)      |
| 12а       | 1550 - 1700 | Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, Ю-В | 150   | 1952           | II           |       | 1.3 - 1.9        |  |                  |
| 12б       | 1550 - 1700 | Зал. Авачинский - п-ов Шипунский, С-З | 150   | 1841?          | III          | 0.85  | 8.7 - 13.5       | 17.9 (20.1)                                  | 18.9 (20.5)      |
| 13а       | 1700 - 1850 | Залив Кроноцкий, Ю-В                  | 150   | 1923           | III?         | 0.22  | 2.5 - 3.9        | 4.6  | 4.9              |
| 13б       | 1700 - 1850 | Залив Кроноцкий, С-З                  | 150   | 1959           | II           |       | 1.1 - 1.5        |  |                  |
| 14        | 1850 - 1950 | П-ов Кроноцкий                        | 100   | 1997           | I            |       | 0.2              |  |                  |
| 15        | 1950 - 2050 | Залив Камчатский                      | 100   | ?              | III?         | 0.36  |                  | 7.5 (12.5)                                   | 5.3 (8.5)        |
| 16        | 2050 - 2100 | П-ов Камчатский                       | 50    | 1971           | II           |       | 0.3              |  |                  |
|           |             |                                       |       |                |              |       |                  | $\sum P(t_0 \leq 1923)$                      |                  |
|           |             |                                       |       |                |              |       |                  | 89.0 (80.0)                                  | 89.0 (80.0)      |

Примечание. Принятые номера участков см. на рис. 1; t<sub>0</sub> – год возникновения последнего землетрясения с  $M \geq 7.7$ ; L – длина участка вдоль Курило-Камчатской дуги (км);

I, II, III – стадии сейсмического цикла; В – параметр, равный  $P(A) \cdot P(D)$ , вероятность  $P(M \geq 7.7)$  пропорциональна 1 - В; P<sub>3</sub> – значения вероятности из табл.

1. Значения вероятности P в скобках соответствуют их величинам на 2001–2005 гг. [19]. Средняя долговременная величина  $P(M \geq 7.7) = 3.6 - 4.2\%$ .



**Рис. 2.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Камчатки на 2004 - 2008 гг. «сейсмические бреши» и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$ , глубины  $H=0-80$  км.

1 - номер участка; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений; 3 - границы областей очагов, 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 - предполагаемая область очага землетрясения 1841г.; 7 - наиболее вероятные места следующих землетрясений с  $M \geq 7.7$ ; 8 - возможные места следующих таких землетрясений; 9 - зона прогноза; 10 - оси глубоководных желобов; 11 - ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 12 - область аномальных значений параметра  $V < 0.25$ ; 13 - область аномальных значений параметра  $V < 0.02$ , соответствующая отклонению от нормы с вероятностью 0.98; 14 - вероятности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$ ; в 2004– 2008 гг.; 15 - эпицентры землетрясений за 04.1999 – 03.2003 гг. с  $6.5 < M_s < 7.7$ ; 16 - эпицентры землетрясений за тот же период с  $5.5 < M_s < 6.5$ .

Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с  $M \geq 7.7$  в одном месте в течение 5 лет равна 3.6 – 4.2%.



Таблица 4. Долгосрочный сейсмический прогноз для Камчатки на 04.2004 – 03.2009 гг. ( $H \leq 80$  км)

| У фактор, №                              | А, км     | Район                            | Стадия цикла и ее оценка по данным 04.1999 г.-1.03. 2004г. |       |       |           | Прогноз на 04.2004 – 03.2008 гг. |                    |       |       |        |                  | Вероятная очередность |          |
|--|-----------|----------------------------------|--|-------|-------|-----------|----------------------------------|--------------------|-------|-------|--------|------------------|-----------------------|----------|
|  |           |                                  | Стадия   | P(A)  | P(D)  | P(A)*P(D) | A <sub>10</sub>                  | A <sub>10</sub> ±σ | P~0.8 | P~0.5 | P~0.15 | M <sub>max</sub> |                       | P(M≥7.7) |
| 11                                       | 1350-1550 | Юг Камчатки                      | III  | 0.95  | 0.71  | 0.67      | 1.0-1.9                          | 0.7-2.9            | 6.0   | 6.5   | 7.0    | 8.0              | 12.6 (10.3)%          | 2 (3)    |
| 12                                       | 1550-1700 | Зал. Авачинский – п-ов Шипунский | III  | 0.04  | 0.28  | 0.011     | 1.2-2.1                          | 0.8-3.2            | 5.9   | 6.4   | 6.9    | 8.0              | 28.6 (23.4)%          | 1 (1)    |
| 13                                       | 1700-1850 | Залив Кроноцкий                  | II (III)   | 0.72  | 0.64  | 0.46      | 1.2 (1.3-3)                      | 0.8-1.9 (0.8-4.5)  | 5.9   | 6.4   | 6.9    | (8.0)            | 3.9 (12.7)%           | (2?)     |
| 14                                       | 1850-1950 | П-ов Кроноцкий                   | I  |       |       |           | 7.5-2.6                          | 11.3-1.7           | 6.0   | 6.5   | 7.0    |                  | 0.2%                  |          |
| 15                                       | 1950-2050 | Зал. Камчатский                  | III?   | 0.80  | 0.81  | 0.64      | 1.2-3                            | 0.8-4.5            | 6.0   | 6.5   | 7.0    | 7.9              | 6.9 (5.6)%            | 3 (4)    |
| 16                                       | 2050-2100 | П-ов Камчатский                  | II   |       |       |           | 0.8                              | 0.5-1.2            | 5.7   | 6.2   | 6.7    |                  | 0.3%                  |          |
| Оценка критических значений вероятностей |           |                                  |  | 0.062 | 0.308 | 0.019     |                                  |                    |       |       |        |                  |                       |          |

Примечание. 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. Знаком вопроса отмечен участок, в котором вероятность такого события меньше. P(A) и P(D) – вероятности достижения наблюдавшихся значений A<sub>10</sub> и D на II стадии цикла; V=P(A)\*P(D) – вероятность таких значений V на II стадии цикла; A<sub>10</sub> – сейсмическая активность; D – выделяемая сейсмическая энергия; M – магнитуды, P – соответствующие вероятности; P(M≥7.7) – вероятности возникновения сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  в двух вариантах - 13 участок проходит II стадию сейсмического цикла, 13 участок проходит III стадию цикла (цифры для второго варианта в скобках).

Таблица 4. Долгосрочный сейсмический прогноз для Камчатки на 04.2004 – 03.2009 гг. ( $H \leq 80$  км)

| У фактор, №                              | А, км     | Район                            | Стадия цикла и ее оценка по данным 04.1999 г.-1.03. 2004г. |       |       |           | Прогноз на 04.2004 – 03.2008 гг. |                    |       |       |        |                  | Вероятная очередность |          |
|--|-----------|----------------------------------|--|-------|-------|-----------|----------------------------------|--------------------|-------|-------|--------|------------------|-----------------------|----------|
|  |           |                                  | Стадия   | P(A)  | P(D)  | P(A)*P(D) | M                                |                    |       |       |        |                  |                       |          |
|  |           |                                  |  |       |       |           | A <sub>10</sub>                  | A <sub>10</sub> ±σ | P~0.8 | P~0.5 | P~0.15 | M <sub>max</sub> |                       | P(M≥7.7) |
| 11                                       | 1350-1550 | Юг Камчатки                      | III  | 0.95  | 0.71  | 0.67      | 1.0-1.9                          | 0.7-2.9            | 6.0   | 6.5   | 7.0    | 8.0              | 12.6 (10.3)%          | 2 (3)    |
| 12                                       | 1550-1700 | Зал. Авачинский – п-ов Шипунский | III  | 0.04  | 0.28  | 0.011     | 1.2-2.1                          | 0.8-3.2            | 5.9   | 6.4   | 6.9    | 8.0              | 28.6 (23.4)%          | 1 (1)    |
| 13                                       | 1700-1850 | Залив Кроноцкий                  | II (III)   | 0.72  | 0.64  | 0.46      | 1.2 (1.3-3)                      | 0.8-1.9 (0.8-4.5)  | 5.9   | 6.4   | 6.9    | (8.0)            | 3.9 (12.7?)%          | (2?)     |
| 14                                       | 1850-1950 | П-ов Кроноцкий                   | I  |       |       |           | 7.5-2.6                          | 11.3-1.7           | 6.0   | 6.5   | 7.0    |                  | 0.2%                  |          |
| 15                                       | 1950-2050 | Зал. Камчатский                  | III?   | 0.80  | 0.81  | 0.64      | 1.2-3                            | 0.8-4.5            | 6.0   | 6.5   | 7.0    | 7.9              | 6.9 (5.6)%            | 3 (4)    |
| 16                                       | 2050-2100 | П-ов Камчатский                  | II   |       |       |           | 0.8                              | 0.5-1.2            | 5.7   | 6.2   | 6.7    |                  | 0.3%                  |          |
| Оценка критических значений вероятностей |           |                                  |  | 0.062 | 0.308 | 0.019     |                                  |                    |       |       |        |                  |                       |          |

Примечание. 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. Знаком вопроса отмечен участок, в котором вероятность такого события меньше. P(A) и P(D) – вероятности достижения наблюдавшихся значений A<sub>10</sub> и D на II стадии цикла; V=P(A)\*P(D) – вероятность таких значений V на II стадии цикла; A<sub>10</sub> – сейсмическая активность; D – выделяемая сейсмическая энергия; M – магнитуды, P – соответствующие вероятности; P(M≥7.7) – вероятность возникновения сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  в двух вариантах – 13 участок проходит II стадию сейсмического цикла, 13 участок проходит III стадию цикла (цифры для второго варианта в скобках).

захватывать не только очаг приближающегося сильнейшего землетрясения, но и прилегающие к нему области. Поэтому участки прогноза были увеличены, и на рис. 2 были объединены участки 11а и 11б, 12а и 12б, 13а и 13б.

Сейсмическая обстановка в участке 13 является сложной: здесь находится область очага 4.05.1959 г.,  $M=7.8$ , половина области очага землетрясения 5.12.1997 г.,  $M=7.8-7.9$ , а также «сейсмические бреши» в средней части очага землетрясения 8.02.1923 г.,  $M=8.3$ , и в прибрежной полосе в северном углу участка 13 (рис. 2). Ввиду этого дополнительный долгосрочный сейсмический прогноз для участка 13 делался в двух вариантах, для II и III стадий сейсмического цикла (табл. 4). При оценке вероятностей  $P(M \geq 7.7)$  по обоим вариантам «сейсмических брешей» среди участков 11 – 16 было принято, что суммарная вероятность в них остается такой же, как в табл. 3 и на рис. 1, т.е.  $\Sigma P(M \geq 7.7, 11-16) = 52.6\%$ .

На рис. 2 в дополнение к рис. 1 нанесены изолинии параметра  $B$  за предшествующие 5 лет, 1999 – 03.2004 гг. Величины  $B$  осреднялись в круге радиуса 50 км. Изолиния  $B=0.25$  показывает область, в которой значения  $B$  меньше средних для II стадии цикла. Изолиния  $B=0.02$  показывает область, в которой лежат центры кругов радиуса 50 км, в которых параметр  $B$  в течение предшествующих 5 лет был на уровне, характерном для III заключительной стадии сейсмического цикла. Круги такого радиуса близки по размерам к областям очагов землетрясений с  $M=7.7$ . Изолинии  $B$  показывают, что наиболее вероятным местом очагов следующих землетрясений с  $M \geq 7.7$  являются Авачинский залив вблизи г. Петропавловска-Камчатского (участок 12), а также прилегающие к нему части участков 11 и 13, Южной Камчатки и Кроноцкого залива (рис. 2, табл. 4). В дополнение к сказанному ниже несколько подробнее рассматривается вопрос об использовании изолиний  $B$ .

*Построение изолиний параметра  $B$  для Камчатки.* Параметр  $B$  в качестве характеристики вероятности того, что участок - «сейсмическая брешь», вступил в стадию форшоков [19], служит для оценки относительной опасности «брешей». Наиболее опасными считаются участки («сейсмические бреши»), для которых значение параметра  $B$  меньше определенного порогового уровня. В качестве опорных значений используются два пороговых уровня параметра  $B$ : 0.25 и 0.02, рассчитанных по пятилетним временным интервалам для возможных очагов землетрясений с  $M \geq 7.7$  со средними размерами  $150 \times 75$  км и площадью около  $9000 \text{ км}^2$ . Значение 0.25 соответствует одновременному превышению средних (для спокойной II стадии сейсмического цикла) уровней сразу двух параметров:  $A_{10}$  и  $D$ . Значение  $B=0.02$  несколько меньше вероятности превышения верхней границы стандартного отклонения одновременно каждым из параметров  $A_{10}$  и  $D$ . В «сейсмических брешах» подобные значения свидетельствует о высокой вероятности завершения процесса длительной подготовки сильнейшего землетрясения и наступления III, заключительной, стадии сейсмического цикла.

Одним из результатов работ по усовершенствованию методики долгосрочного прогноза является построение карт изолиний вероятности параметра  $B = P(A_{10}) * P(D)$ . Построение таких карт позволяет уточнить как пространственное положение наиболее опасных зон, так и временное развитие сейсмического процесса в «сейсмических брешах».

Построение изолиний с областью осреднения в виде кругов радиусом 75 км позволяет получать оценки, характерные для областей очагов сильнейших землетрясений. Однако, при этом велика вероятность захвата областей, не связанных с центром осреднения, и малосейсмичных областей, прилегающих к полосе прогноза. В этом данная методика уступает стандартному осреднению по участкам прогноза. Область осреднения радиуса 50 км позволяет получать значения, характерные для участков полосы прогноза размером  $50 \times 100$ ,  $100 \times 100$  км. Пробные построения показали, что такое осреднение позволяет получить достаточно хорошее представление о деталях расположения и развития опасных участков, вместе с тем сохраняя опре-

деленный выше смысл параметра  $B$ . Дальнейшее уменьшение радиуса осреднения приводит к увеличению детальности получаемых результатов, однако смысл и пороговые значения параметра  $B$  значительно меняются.

При построении карт параметра  $B$  использовалась упрощенная методика определения сейсмической активности  $A_{10}$  на основе прямого подсчета количества землетрясений из диапазона  $K_s=9.5-10.4$ , отличающаяся от определения  $A_{10}$  по графику повторяемости способом Ю.В. Ризниченко [6].

Для проверки упрощенной методики использовались величины  $A_{10}$ , полученные при построении успешного прогноза Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. с  $M=7.7-7.9$ . Результаты расчетов близки к значениям, приведенным в таблице долгосрочного прогноза на 1997 – 2001 гг. [18].

В настоящее время наиболее активным и сейсмически опасным является участок сейсмофокальной зоны напротив Авачинского залива (участок 12, рис. 2). Построение изолиний  $B$  для различных интервалов времени показало, что в этом районе в течение всего исследуемого интервала времени неоднократно появлялись области аномальной сейсмической активности. На рис. 2 представлена совмещенная карта прогноза, для которой по шести участкам прогноза рассчитаны вероятности сильнейшего землетрясения для интервала времени 04.2004 – 03.2009 г. и нанесены области параметра  $B$  для уровней 0.02 и 0.25. Для приемлемого соответствия численных значений изолиний  $B$  значениям, получаемым для сегментов полосы прогноза, радиус осреднения был выбран равным 50 км. Положение изолиний критического повышения интенсивности сейсмического процесса ( $B=0.02$ ) в пределах 12-го участка полосы прогноза (зал. Авачинский – п-ов Шипунский) позволяет уточнить положение наиболее опасной области. Возможно, что более опасна внешняя, более удаленная от побережья, часть участка 12а (рис. 1). Однако такое предположение требует дополнительной проверки, так как «сейсмическая брешь» находится в участке 12б, и, как показало исследование развития сейсмического процесса для двух сильнейших камчатских землетрясений 15.12.1971 г.,  $M=7.8$ , и 5.12.1997 г.,  $M=7.8-7.9$ , в очаг может входить лишь часть активизированной до этого области.

Кроме наиболее опасного района – напротив Авачинского залива – на карте есть другие площади, ограниченные изолинией  $B=0.25$ . Одна из них расположена в районе очага Усть-Камчатского землетрясения 15.12.1971 г. (участок 16). Последний район не относится к «сейсмическим брешам», поэтому активизация сейсмического процесса в нем, по-видимому, также не является прогностическим признаком.

Несколько иная ситуация в районе Южной Камчатки (участок 11). Это второй по опасности район у побережья Камчатки. Северо-восточная часть расположенной в этом районе «сейсмической брешы» близка к изолинии  $B=0.25$ , но в целом в настоящее время он является относительно спокойным. Можно предположить, что опасность сильнейшего ( $M \geq 7.7$ ) землетрясения в этом районе на ближайшее пятилетие существенно ниже, чем в участке 12, рис. 2.

Полученные результаты дополняют выводы первого варианта долгосрочного сейсмического прогноза.

На рис. 2 нанесены также эпицентры землетрясений с  $M=5.5-7.0$ , произошедших на глубинах 0 – 80 км в 1999 – 03.2004 г. Самые большие группы этих землетрясений располагаются в участках 12а и 13б (рис. 1, 2). При расчете данных для табл. 1 – 3 и рис. 1 было принято, что участки 12а и 13б проходят II стадию сейсмического цикла, стадию длительного накопления сейсмической энергии. При расчете данных для табл. 4 и рис. 2 было принято, что эти участки могут проходить III заключительную стадию сейсмического цикла в пределах более крупных участков 12 и 13. При этом соответствующие величины  $A_{10}$ ,  $D$ ,  $(1 - B)$  и  $P(M \geq 7.7)$  возросли в табл. 4, по сравнению с ними в табл. 1 – 3.

В целом, на рис. 1, 2 и в табл. 1 - 4 приведены данные долгосрочного сейсмического прогноза для 20 участков всей Курило-Камчатской дуги на 2004 – 2008 гг. и два

дополнительных варианта такого прогноза для участков, расположенных у Камчатки. Отметим их основные особенности и изменения в них, которые произошли, по сравнению с прогнозом на 2001 – 2005 гг. [19].

**Участок №1, мыс Сириха – п-ов Немуро,  $\Delta=0-100$  км.** III стадия цикла. Вероятность  $P(M \geq 7.7) = 11.1\%$ , в три раза выше средней. Она возросла с 3.9% за 2001 – 2005 гг. из-за увеличения  $A_{10}$ , D и (1 – B) под влиянием соседнего Хоккайдского землетрясения 25.09.2003,  $M=8.1$ .

**Участки 2 - 5, Южные Курильские острова,  $\Delta=100-600$  км.** Ожидается I стадия около о. Шикотан (участок 3б), и II стадия в остальных участках. Прогнозируемые величины  $P(M \geq 7.7)$  - в пределах 0.3 – 1.5%. Эти значения близки к тем, которые прогнозировались на 2001 – 2005 гг. [19] (табл. 3), и существенно ниже средних величин для Курило-Камчатской дуги  $P(M \geq 7.7) = 3.6 - 4.2\%$ . Таким образом, прогнозируется, что вероятность сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  и вызванных ими цунами на Южных Курильских островах в 2004 – 2008 гг. будет в среднем в 4.5 раза меньше их долговременной вероятности.

**Участок 6, мыс Кастрикум – пролив Буссоль,  $\Delta=600-750$  км.** Для этого участка получились расходящиеся оценки. Последнее сильнейшее землетрясение было в нем 7.09.1918 г.,  $M=8.3$ . Вероятность  $P(M \geq 7.7)$  в 2004 – 2008 гг., определенная по времени  $t_n$ , прошедшему с начала цикла, равняется 4.4% (табл. 1). Однако, по параметрам  $A_{10}$ , D, (1 – B) получена малая величина вероятности на 2004 – 2008 гг. – 0.9% (табл. 2). Более вероятно то, что участок 6 проходит II стадию сейсмического цикла, чем его III стадию, и величина  $P(M \geq 7.7) = 4.4\%$  также является более вероятной. В любом случае вероятность возникновения сильнейших землетрясений в участке 6 в 2004 – 2008 гг. представляется средней или пониженной.

**Участки 7 - 9, Средние Курильские о-ва – о. Шиашкотан,  $\Delta=750-1200$  км.** Последнее землетрясение с  $M \geq 7.7$  было здесь 1.05.1915 г.,  $M=8.1 - 8.3$ . Все три участка этого звена Курильской гряды могут проходить III стадию сейсмического цикла. Вероятности землетрясений с  $M \geq 7.7$  в них возросла по сравнению с 2001 – 2005 гг. и равна для 7, 8 и 9 участков соответственно 11.6, 9.4, 8.1%, т.е. в 2 – 3 раза превышают среднюю величину 3.6 – 4.2%.

**Участок 10, Северные Курильские о-ва – о. Парамушир,  $\Delta=1200-1350$  км.** Последнее сильнейшее землетрясение было здесь 4.11.1952 г.,  $M=8.5$ . Наиболее вероятно, что этот участок проходит II стадию сейсмического цикла. Вероятность сильнейших землетрясений, определенная по времени  $t_n$  с начала цикла,  $P(M \geq 7.7) = 1.9\%$ , т.е. вдвое ниже средней.

Для последующих участков 11 – 16, расположенных у Камчатки, составлены три варианта долгосрочного сейсмического прогноза на 2004 – 2008 гг. (рис. 1, 2, табл. 1 – 4).

**Участки 11а и 11б, 11, Южная Камчатка,  $\Delta=1350-1550$  км.** Последние сильнейшие землетрясения были 24.06.1904 г.,  $M=7.7$ , и 4.11.1952,  $M=8.5$ . В том случае, если участок 11а проходит III стадию, то  $P(M \geq 7.7) = 17.1\%$ . Если участок 11б проходит II стадию, то  $P(M \geq 7.7) = 2.5\%$ . Суммарная вероятность для всего участка 11 равна 19.6% (табл. 1 – 3, рис. 1).

На рис. 2 и в табл. 4 приведены две дополнительные оценки для всего участка 11. Они сделаны в предположении, что весь участок 11 может проходить III стадию цикла. Варианты, зависящие от выбора стадии для участка 13, дали величины  $P(M \geq 7.7) = 12.6$  (10.3)% (табл. 4). Среднее значение из трех равно 14.2%. Таким образом, во всех трех оценках вероятность сильнейшего землетрясения с  $M \geq 7.7$  на Южной Камчатке в 2004 – 2008 гг. в 2.6 – 5 раз, в среднем в 3.6 раза, превышает среднюю долговременную.

**Участки 12а, 12б, 12, Авачинский залив, район г. Петропавловска-Камчатского,  $\Delta=1550-1700$  км.** Это участок, в котором сильнейшие землетрясения могут нанести наибольший ущерб и в котором параметр B, показывающий вероятность возникновения землетрясения с  $M \geq 7.7$ , достигает критических значений -  $B < 0.02$  (рис. 2, табл. 4).

Если участок 12а проходит II стадию цикла, то для него  $P(M \geq 7.7) = 1.9\%$ . Если

участок 126 проходит III стадию цикла, то  $P(M \geq 7.7) = 18.9\%$ . (табл. 2, 3, рис. 1). Суммарная вероятность равна 21.8%.

Два варианта оценки такой вероятности для всего участка 12, зависящие от того, какая стадия цикла принимается для участка 13, дали величины  $P(M \geq 7.7) = 28.6$  (23.4)% (табл. 4, рис. 2). Среднее значение из трех равно 24.6%.

По полученным оценкам вероятность  $P(M \geq 7.7)$  в Авачинском заливе (участок 12) является наибольшей среди 20 участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги и в 2004 – 2008 гг. в 5.6 – 7.3 раза, в среднем в 6.3 раза, будет превышать долговременную вероятность возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$ .

*Участки 13а и 13б, 13, Кроноцкий залив,  $\Delta = 1700-1850$  км.* Более половины площади занята областями очагов сильнейших землетрясений 4.11.1952, 4.05.1959, 5.12.1997 гг., и в различных его частях могут проходить I, II, III стадии сейсмического цикла. Если участок 13а проходит III стадию цикла, то в нем  $P(M \geq 7.7) = 4.9\%$ . Если участок 13б проходит II стадию цикла, то для него  $P(M \geq 7.7) = 1.5\%$ . Суммарная вероятность равна 6.4% (табл. 2, 3, рис. 1).

В том случае, если участок 13 в целом проходит II стадию, то  $P(M \geq 7.7) = 3.9\%$ . Если же он проходит III стадию, то  $P(M \geq 7.7) = 12.7\%$  (табл. 4, рис. 2). Среднее из трех значений вероятности для всего участка 13 равно 7.7%, что в 2 раза превышает среднюю долговременную вероятность. Судя по изолиниям параметра В и положению «сейсмические бреши» в области очага землетрясения 1923 г., наиболее опасна южная часть участка 13.

*Участок 14, п-ов Кроноцкий,  $\Delta = 1850-1950$  км.* Этот участок, в основном, находится в области очага Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.,  $M = 7.8 - 7.9$ . В ней в течение следующего пятилетия должна продолжаться I стадия цикла, длительная стадия афтершоков, количество которых снижается до уровня II стадии в течение 15 – 20 лет. Для участка 14 по времени с начала цикла  $t_H$  прогнозируется низкая вероятность сильнейших землетрясений,  $P(M \geq 7.7) = 0.2\%$  (табл. 1, 3, 4, рис. 1, 2). Эти величины в 20 раз меньше средней вероятности таких землетрясений.

*Участок 15, Камчатский залив,  $\Delta = 1950-2050$  км.* Основная часть этого участка занята «сейсмической брешью». Получены три оценки вероятности  $P(M \geq 7.7)$  для этого участка по параметру В (табл. 2, 3, 4, рис. 1, 2). При расчете вероятностей для всех 20 выделенных участков Курило-Камчатской сейсмогенной зоны получена величина 5.3% (табл. 2, 3, рис. 1). При двух дополнительных оценках  $P(M \geq 7.7)$  для участков 11, 12, 13 и 15 у берегов Камчатки получены величины  $P(M \geq 7.7) = 6.9$  (5.6)%. Средняя величина вероятности = 5.9%, что в 1.5 раза превышает долговременную величину такой вероятности.

По долгосрочному сейсмическому прогнозу на 2001 – 2005 гг. [19] вероятность была выше, равнялась 8.5%, и участок 15 считается третьим по уровню сейсмической опасности на Камчатке. В 2001 – 2003 гг. здесь наблюдалось уменьшение параметров  $A_{10}$ , D,  $(1-B)$ , что обусловило некоторое снижение прогнозируемой величины  $P(M \geq 7.7)$ .

*Участок 16, п-ов Камчатский,  $\Delta = 2050-2100$  км.* Значительная часть площади этого участка занята областью очага Камчатского землетрясения 25.12.1971 г.,  $M = 7.8$ . Принимается, что он проходит II стадию цикла,  $t_H = 32$  года. Размеры участка – наименьшие среди 20 выделенных участков, 100x50 км. Вероятность  $P(M \geq 7.7)$ , оцененная по времени с начала сейсмического цикла, на 2004 – 2008 гг., равна 0.3% (табл. 1, 2, 4, рис. 1, 2). Полученная величина в 13 раз меньше долговременной. Участок 16 и области очагов Шикотанского землетрясения 4.10.1994 г.,  $M = 8.1$  (участок 3б), и Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.,  $M = 7.8-7.9$  (участок 14), относятся к наименее вероятным местам возникновения сильнейших землетрясений в 2004 – 2008 гг., где  $P(M \geq 7.7) = 0.2 - 0.3\%$ .

Вероятность возникновения сильнейших землетрясений в 2004 – 2008 гг. в наиболее опасных местах, в Авачинском заливе и на Южной Камчатке (участки 12 и 11) на два порядка больше и равна 24.6 и 14.2% соответственно.

Обсуждение результатов приводится в 3 разделе статьи.

## 2. Ретроспективный долгосрочный прогноз на 2001 – 2005 гг. для Хоккайдо и землетрясения 25.09.2003 г., $M=8.1$

Один из возможных путей усовершенствования и развития метода долгосрочного прогноза сильнейших землетрясений является его распространение на другие высокосейсмичные регионы мира. Среди регионов мира, в которых существуют сходные сеймотектонические условия, наиболее близким является участок Тихоокеанского сейсмического пояса, расположенный у о. Хоккайдо. Этот участок прилегает к Курило-Камчатской дуге и является ее продолжением. Здесь, в Тихом океане у юго-восточного побережья о. Хоккайдо, 25.09.2003 г. произошло землетрясение с  $M=8.1$ . В связи с этим для данного района был построен ретроспективный долгосрочный прогноз на 2001 – 2005 гг. Данный прогноз является расширением на этот район методики долгосрочного сейсмического прогноза, применяемого для Курило-Камчатской дуги.

С самого начала построения метода долгосрочного сейсмического прогноза сейсмогенная зона северо-восточной Японии, начиная с очага землетрясения в районе Токио 1.09.1923 г.,  $M=8.2$ , рассматривалась в качестве естественного продолжения Курило-Камчатской зоны прогноза. В работах [12 – 14, 19, 20] приведены данные о расположении очагов сильнейших землетрясений 1898–1963 гг. для северо-восточной Японии, выделены «сейсмические бреши», определены внешняя и внутренняя границы полосы прогноза, аналогичные используемым для Камчатки и Курильских островов. Был сделан успешный долгосрочный прогноз места землетрясения 16.05.1968 г.,  $M=7.9$ , которое заполнило «сейсмическую брешь» южнее Хоккайдо [20]. Эти работы могли служить основой для более полного и последовательного применения метода в Японии. Среди нерешенных задач были две: определение сейсмических параметров  $A_{10}$ ,  $D$ , и уточнение границ области прогноза в этом районе.

Для района Японских островов не применимы региональные каталоги Курильской и Камчатской сейсмологических сетей, используемые при определении основных параметров метода  $A_{10}$  и  $D$ . В то же время, для района Японии имеется каталог, сопоставимый по детальности с Курило-Камчатским, построенный на основе данных большого числа сейсмических станций; данные из этого каталога можно найти на сайте ISC (<http://www.isc.ac.uk>). Таким образом для решения поставленной задачи необходимо определить зависимость  $K_S(M_{JMA})$ . Задача оказалась не совсем тривиальной, учитывая что данные шкалы не пересекаются, а итоговые зависимости, приемлемые для построения прогноза, получились при аномальном наклоне графика повторяемости вычисленного  $K_S$  ( $-0.5 \div -0.7$ ).

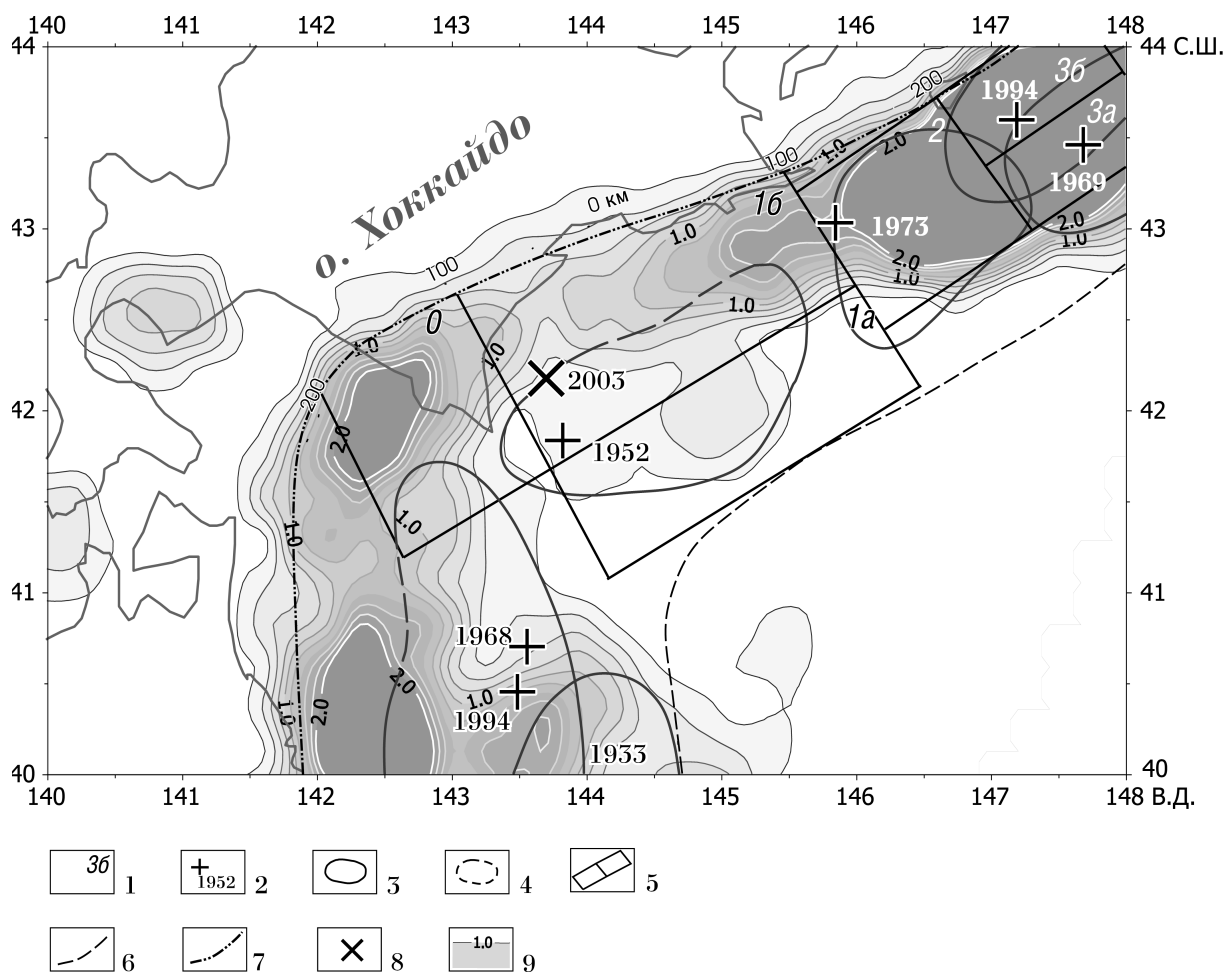
В качестве наиболее перспективной для пересчета межмагнитудных зависимостей между  $K_S$  и региональными магнитудами, в том числе и для несмежных с Камчаткой регионов, выбрана магнитуда  $m_b$  (NEIC). Предполагается, что полученные результаты, обеспечивая точность определения параметра  $A_{10}$ , позволят получить необходимое качество прогноза. Для определения параметра  $D$ , лучшей альтернативой региональным магнитудам в дальнейшем может служить моментная магнитуда  $M_w$  [1].

В случае достаточно представительной выборки возможно получение зависимостей между энергетическими и магнитудными шкалами по сопоставлению графиков повторяемости.

Для определения параметров зависимости использовались данные Камчатского регионального каталога (для Камчатской сейсмофокальной зоны), Японского каталога JMA (данные ISC, <http://www.isc.ac.uk>), магнитуды  $m_b$  (NEIC, <http://neic.usgs.gov>) для соответствующих районов за 1983 – 1999 гг. В результате получено, что линейная зависимость

$$K_S = 1.77 * M_{JMA} + 3.40 \quad (4)$$

должна удовлетворительно представлять соотношение  $K_S(M_{JMA})$ , по крайней мере в диапазоне  $M_{JMA} < 5.5$  и  $K_S < 13.5$ . Отклонения от линейной зависимости за пределами



**Рис. 3.** Карта изолиний параметра  $A_{10}$  для сейсмогенной зоны возле о. Хоккайдо по данным за 1996 – 2000 гг.,  $H=0-80$  км.

1 - номера участков; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений; 3 - границы областей очагов, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - зона прогноза; 6 - оси глубоководных желобов; 7 - северо-западная граница зоны землетрясений с глубинами очагов  $H=0-80$  км; 8 - эпицентр землетрясения 25.09.2003 г.; 9 - изолинии параметра  $A_{10}$ , радиус осреднения 38 км.

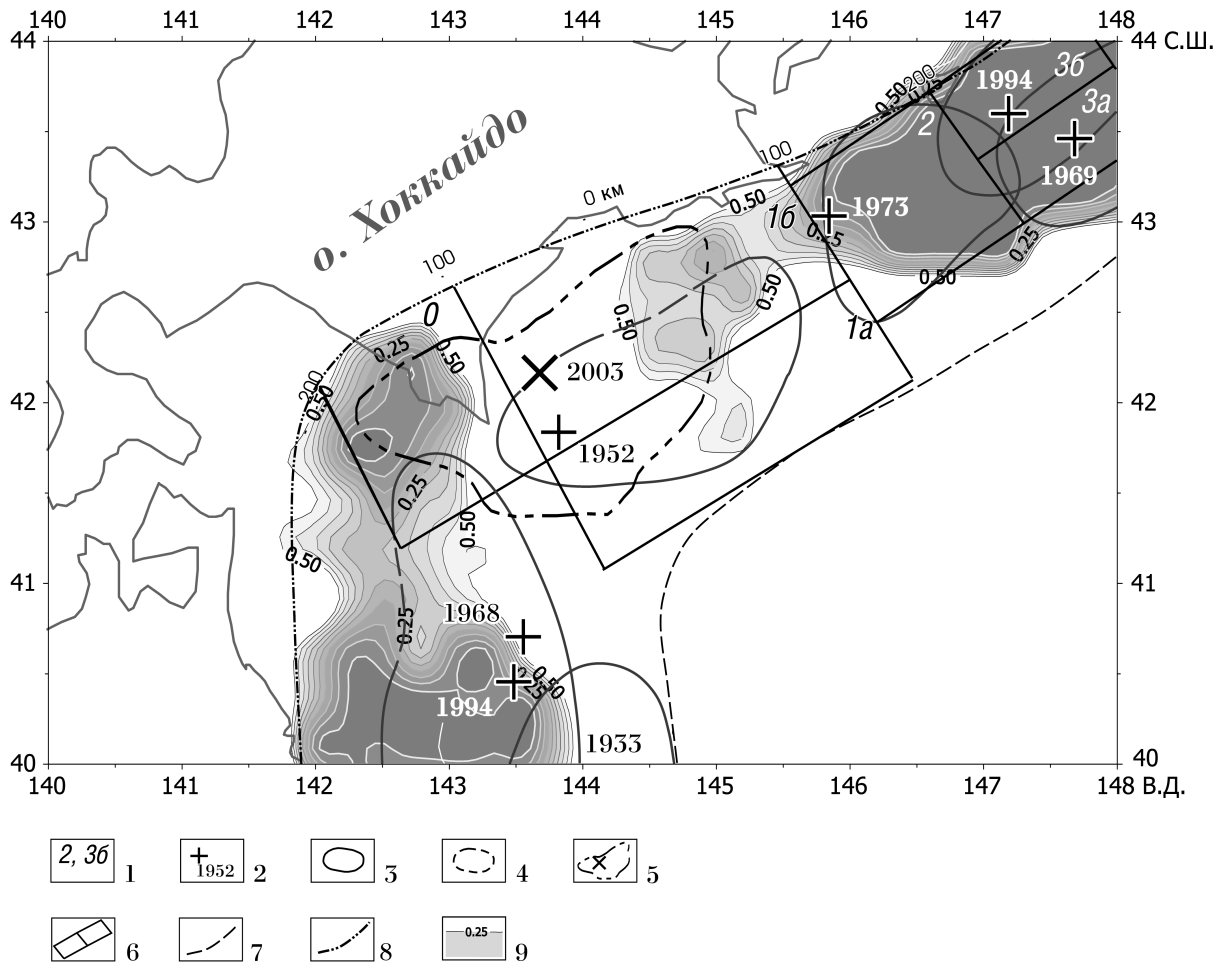
этих диапазонов, по-видимому, в значительной степени определяются ограничением промежуточной магнитуды  $m_b$  на уровне 5.5, и, таким образом, диапазон линейности зависимости (4) несколько шире.

Полученное соотношение (4) позволило построить по стандартной методике границы зоны прогноза и определить необходимые параметры  $A_{10}$ ,  $D$ .

В качестве уточненной северо-западной границы зоны прогноза выбрана сглаженная изолиния  $A_{10}$  (рис. 3), построенная по перекрывающимся площадкам – кругам с радиусом 38 км по стандартной методике (способом Ю.В. Ризниченко) по графику повторяемости [6]. На участке вдоль о. Хонсю полученная граница совпала с приведенной в работах [12, 13, 14, 20], для о. Хоккайдо эта граница отодвинута за береговую линию (рис. 1, 3, 4, 5).

С учетом полученных данных начало первого участка карты прогноза для Курило-Камчатской дуги [19] было отодвинуто к юго-западному краю очага землетрясения 4.03.1952 г. до линии, разделяющей сейсмоактивные зоны Хоккайдо и Хонсю. Добавлен также новый участок (условный номер – 0), захватывающий зону активности (изолинии пониженных значений  $V=P(A_{10}) \cdot P(D)$  с областью осреднения радиусом 50 км, рис. 4), расположенную южнее о. Хоккайдо (рис. 3, 4, 5).





**Рис. 4.** Карта изолиний параметра  $V$  для сейсмогенной зоны возле о. Хоккайдо по данным за 1996 – 2000 гг.,  $H=0-80$  км.

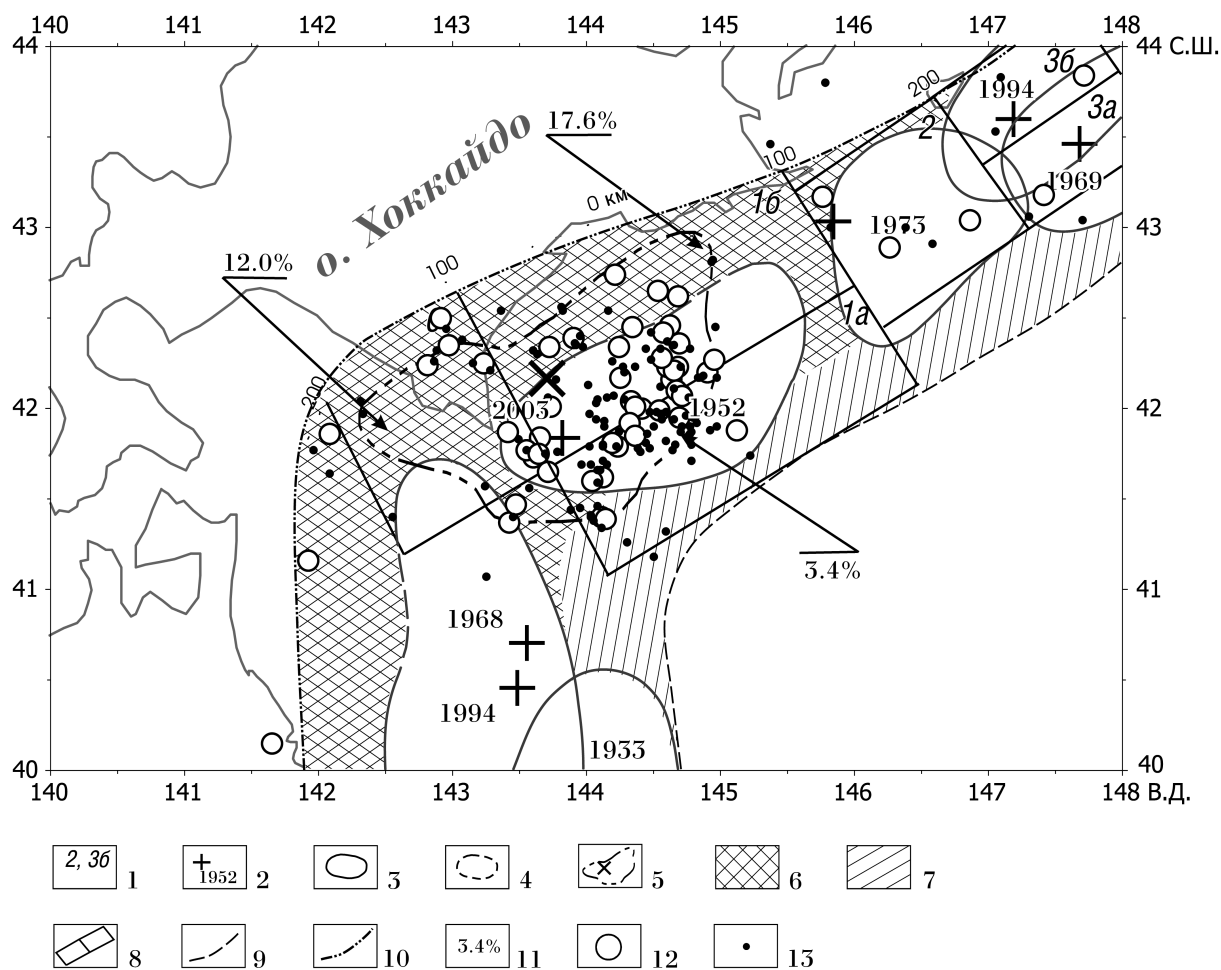
1 - номера участков; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений; 3 - границы областей очагов, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - эпицентр и граница очага землетрясения 25.09.2003 г., построенная по данным за полгода после него; 6 - зона прогноза; 7 - оси глубоководных желобов; 8 - северо-западная граница зоны землетрясений с глубинами очагов  $H=0-80$  км; 9 - изолинии параметра  $V=P(A_{10}) \cdot P(D)$ , радиус осреднения 50 км.

Оценки вероятности случайного превышения по сейсмической активности  $P(A_{10})$ , и сброса сейсмической энергии  $P(D)$ , а также параметр  $V=P(A_{10}) \cdot P(D)$  для участков 0, 1а и 1б (табл. 5) получены в предположении, что характеристики сейсмического цикла в этом районе такие же, как и для Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Это предположение представляется верным, так как рассматриваемая область юго-восточного о. Хоккайдо является продолжением Курило-Камчатской островной дуги.

Было принято, что участок 1а, прилегающий к глубоководному желобу и наполовину занятый очагом землетрясения 4.03.1952 г.,  $M=8.3$ , менее сейсмичен, чем участок 1б, и проходит II стадию цикла,  $t_n=48$  лет. Соответствующая оценка вероятности  $P^1(M \geq 7.7)$  на 2001 – 2005 гг. была сделана по нормальному распределению вероятности в течение сейсмического цикла длительностью  $120 \pm 50$  лет.

Вероятность  $P(M \geq 7.7)\%$  определена для участков 0 и 1б получена на основе пропорции, связывающей аналогичные величины и параметр 1 -  $V$  для Курило-Камчатской зоны на 2001 – 2005 гг., с учетом длины участков прогноза 0 и 1б (табл. 2 и 3). Полученные вероятности  $P(M \geq 7.7)$  для участков 0, 1а, 1б приведены в табл. 5 и на рис. 5.

Если в рамках ретроспективного прогноза рассматривать участки 0 и 1б в качестве прогнозируемых областей сильнейшего землетрясения, то можно отметить, что соот-



**Рис. 5.** Ретроспективный прогноз мест и вероятности землетрясений с  $M \geq 7.7$  для района о. Хоккайдо на 2001 - 2005 гг.,  $H=0-80$  км.

1 - номера участков; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений; 3 - границы областей очагов, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - эпицентр и граница очага землетрясения 25.09.2003 г., построенная по данным за полгода; 6 - наиболее вероятные места следующих землетрясений с  $M \geq 7.7$ ; 7 - возможные места следующих таких землетрясений; 8 - зона прогноза; 9 - оси глубоководных желобов; 10 - северо-западная граница зоны землетрясений с глубинами очагов  $H=0-80$  км; 11 - вероятности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  в 2001–2005 гг.; 12 - эпицентры афтершоков за первые полгода с  $M_s \geq 5.0$ ; 13 - эпицентры афтершоков за первые полгода с  $M_s < 5.0$ .

ветствующие им значения 12.0 и 17.6% (в сумме 29.6%) на 2001 – 2005 гг. значительно превышали среднюю долговременную величину (3.6 – 4.2%). Существенно большие вероятности (20.5 и 18.3%, в сумме 38.8%) определены на этот же период только для юга Камчатки и Авачинского залива (рис. 1, табл. 3). Таким образом, «сейсмическая брешь», охватывающая оба участка общей протяженностью 300 км вдоль юго-восточного побережья о. Хоккайдо, была в 2001 г. одним из наиболее опасных мест в участке Тихоокеанского сейсмического пояса длиной 2300 км, расположенном между г. Усть-Камчатск на Камчатке и мысом Эримо на о. Хоккайдо.

Для построенной зоны прогноза была также рассчитана карта изолиний параметра  $B$  по кругам осреднения радиусом 50 км за период 1996 - 2000 гг. (рис. 4). Характерной особенностью оказалось наличие у побережья о. Хоккайдо двух зон пониженных значений параметра  $B$ , характеризующих аномально высокие значения интенсивности сейсмического процесса.

На рис. 4 имеются две более крупных аномалии параметра  $B$ , располагающиеся у

Таблица 5. Ретроспективный сейсмический прогноз для района о. Хоккайдо на 2001–2005 гг. ( $H \geq 80$  км).

| Участок, №                               | L, км | Район     | Стадия цикла и её оценка по данным 1.01.1996 г. - 31.12.2001 г. |       |       |                 | Прогноз на 2001 – 2005 гг. |                    |       |       |        |                  |               |
|--|-------|-----------|---|-------|-------|-----------------|----------------------------|--------------------|-------|-------|--------|------------------|---------------|
|  |       |           | Стадия  | P(A)  | P(D)  | B=<br>P(A)*P(D) | A <sub>10</sub> (P~0.7)    |                    | M     |       |        |                  |               |
|  |       |           |   |       |       |                 | A <sub>10</sub>            | A <sub>10</sub> ±? | P~0.8 | P~0.5 | P~0.15 | M <sub>max</sub> | P(M≥7.7)<br>% |
| 0  | 100   | Мыс Эримо | III?  | 0.12  | 0.68  | 0.084           | 1.2 - 3                    | 0.8 - 4.5          | 6.0   | 6.5   | 7.0    | 7.8              | 12.0          |
| 1a                                       | 200   | Куширо    | II  |       |       |                 | 1.2                        | 0.8 - 1.9          | 5.8   | 6.3   | 6.8    |                  | 3.4           |
| 1б                                       | 200   | Куширо    | III?  | 0.41  | 0.88  | 0.355           | 1.2 - 3                    | 0.8 - 4.5          | 6.0   | 6.5   | 7.0    | 8.0              | 17.6          |
| Оценка критических значений вероятностей |       |           |   | 0.062 | 0.308 | 0.019           |                            |                    |       |       |        |                  | Σ=33.7        |

Примечание. 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. Средняя долговременная величина  $P(M \geq 7.7) = 3.6 - 4.2\%$ . Остальные обозначения те же, что и в табл. 1 – 4.

Южных Курильских островов и у северо-восточного побережья Хонсю. Карта В построена для периода 1996 – 2000 гг. В это время в названных местах произошли два больших землетрясения: 4.10.1994,  $M=8.1$ , у о. Шикотан и 28.12.1994,  $M_s=7.5$  (HRV) у о. Хонсю. Большие минимумы В обусловлены роями афтершоков этих землетрясений и не имеют прогностического значения.

Полученный результат подтверждает применимость используемой методики долгосрочного прогноза для сейсмогенной зоны у о. Хоккайдо: землетрясение 25.09.2003 г. с  $M=8.1$  в этом районе могло быть заблаговременно предсказано по используемому методу долгосрочного сейсмического прогноза при расширении области прогноза на этот район.

По данным о магнитудах mb (NEIC, <http://neic.usgs.gov>), полученным на 10.2003 – 03.2004 г., по стандартной методике по аномалиям  $A_{10}$  и D [16], но с данными за полгода, построена область очага землетрясения 25.09.2003 г. К этой области относится та часть роя афтершоков, происходящих в течение года, в которой  $A_{10} > 10$  и  $D > 1$ . При получении межмагнитудных зависимостей, необходимых для построения, учтены результаты определения соотношений для  $K_s(M_{JMA})$ , полученные ранее (5). Построение показало, что очаг землетрясения 25.09.2003 г.,  $M=8.1$ , занял не только самое опасное место в «сейсмической брешии», но также значительную часть области очага сильнейшего землетрясения 4.03.1952 г., а также область сейсмического затишья, расположенную в его западной части (рис. 3, 4, 5). Это важная особенность данного землетрясения. Интересны их изучение и сопоставление с аналогичными случаями, каковыми были пары сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений: возле о. Итуруп (6.11.1958 г.,  $M=8.2$ , и 24.03.1978 г.,  $M=8.0$ ), возле о. Шикотан (11.08.1969 г.,  $M=8.2$ , и 4.10.1994 г.,  $M=8.1$ ) и др.

Имеется ряд важных исследований японских авторов о сильных землетрясениях района о. Хоккайдо и их прогнозу [21, 22] и др. Их рассмотрение выходит за рамки данной статьи.

В заключение раздела отметим некоторые его выводы.

Программные и методические разработки по развитию рассматриваемого метода долгосрочного сейсмического прогноза позволили получить карты изолиний параметра В, уточняющие степень опасности сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений в «сейсмических брешах».

На примере ретроспективного прогноза сильного землетрясения, возникшего 25.09.2003 г.,  $M=8.1$ , вблизи о. Хоккайдо, показана возможность и целесообразность применения рассматриваемого метода долгосрочного прогноза в других регионах мира.

### 3. Обсуждение результатов

Основным результатом 1-го раздела статьи является долгосрочный сейсмический прогноз по методу, основанному на закономерностях «сейсмических брешей» и сейсмического цикла, составленный на 2004 – 2008 гг. для 20 участков, на которые разделена наиболее активная полоса сейсмической зоны Курило-Камчатской дуги. В этой полосе, размеры которой 2100x100 км, в тихоокеанской сейсмофокальной зоне на глубинах 0 – 80 км размещается большинство очагов сильнейших разрушительных землетрясений этого региона. Прогноз составлялся, в основном, в той его форме, которая изложена в работе [19]. Кроме выделения «сейсмических брешей», оценки их относительной опасности, прогноза сейсмической активности  $A_{10}$  и средних и сильных землетрясений с  $M=5.7-7.0$  и более, определялись вероятности возникновения сильнейших землетрясений  $P(M \geq 7.7)$  для всех участков Курило-Камчатской дуги. Сопоставляются такие прогнозы на 2001 – 2005 и 2004 – 2008 гг.

Рассматриваемый метод был предложен в 1965 – 1968 гг. и постоянно применяется, совершенствуясь, с 1965 г. [12, 13, 14, 19] и др. Опыт прошедших десятилетий показал, что вероятные места следующих сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  («сейсмические брешы») выделялись с вероятностью 0.8 – 0.9. Прогнозы сейсмической активности  $A_{10}$  и магнитуды землетрясений средней силы, ожидавшиеся с вероятностями 0.8, 0.5, 0.15, оправдывались удовлетворительным образом. Правильно выделялись наиболее опасные «сейсмические брешы» [19]. Можно ожидать, что прогнозы вероятности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  во всех участках сейсмогенной зоны также подтвердятся в дальнейшем.

Очень существенно то, что в сейсмогенной зоне, имеющей по данным сейсмораионирования одинаковую повторяемость сильнейших землетрясений в течение интервалов времени длиной 50, 100 и более лет, средняя вероятность  $P(M \geq 7.7)$  на следующие 5 лет, равная 3.6 – 4.2%, может меняться в пределах двух порядков величин, от 0.2 до 24.6% в нашем случае. Такие изменения необходимо учитывать при оценке сейсмического риска на ближайшие годы и пятилетия.

В практическом отношении основной интерес представляет выделение тех участков, в которых опасность сильнейших землетрясений является наибольшей на ближайшие годы.

Сделанные расчеты и построения (табл. 1 – 4, рис. 1, 2) показали, что вероятность сильнейшего землетрясения в 2004 – 2008 гг., как и в 2001 – 2003 гг., максимальна в районе Авачинского залива и г. Петропавловска-Камчатского (участок 12)  $P(M \geq 7.7) = 24.6\%$  при среднем долговременном значении этой величины 3.6 – 4.2%. Наименьшее расстояние от г. Петропавловска-Камчатского до границы области очага с  $M \geq 7.7$  в Авачинском заливе может равняться 50 – 60 км. Землетрясение с  $M \geq 7.7$ , происходящее в участке 12б, может вызвать сотрясения силой  $I=9$  или 8 – 9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском (рис. 1, 2).

Вторым местом по величине опасности остается соседний участок – Южная Камчатка (участок № 11). Здесь  $P(M \geq 7.7) = 14.2\%$ . Наименьшее расстояние от г. Петропавловска-Камчатского до границы области очага землетрясения с  $M \geq 7.7$  может равняться 110 – 120 км. Землетрясение с  $M \geq 7.7$  из этого района может вызвать колебания силой до 8 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, что было при землетрясении 25.06.1904 г.,  $M=7.7$  [5].

С северо-востока к участку 12 прилегает участок Кроноцкого залива (участок 13). Здесь  $P(M \geq 7.7) = 7.6\%$ . Наименьшее расстояние от г. Петропавловска-Камчатского до границы области очага может быть ~140 – 150 км. Землетрясение с  $M \geq 7.7$ , область очага которого располагается в южной части участка 13 (рис. 2), способно вызвать колебания силой около 7 баллов в г. Петропавловске-Камчатском. Землетрясение 4.05.1959 г.,  $M=7.8$ , произошедшее в участке 13, имело силу 8 баллов в г. Петропавловске-Камчатском (рис. 2) [5].

Таким образом, по данным сделанного прогноза, в 2004 – 2008 гг. Петропавловску-Камчатскому, его населению и объектам угрожают три разрушительных землетрясения с общей вероятностью 46.4%: землетрясение из Авачинского залива ( $P=24.6\%$ ,  $I=9$  или 8 – 9 баллов), от Южной Камчатки ( $P=14.2\%$ ,  $I=8$  баллов), из Кроноцкого залива ( $P=7.6\%$ ,  $I=7$  баллов). Ожидается, что с вероятностью 46.6% в 2004 – 2008 гг. может произойти одно из этих трех землетрясений. Плохо, что среди них наиболее высока вероятность 9-балльного землетрясения,  $P \approx 25\%$ .

На участки 11, 12 и 13 приходится немного менее половины суммарной вероятности землетрясения с  $M \geq 7.7$  всей Курило-Камчатской дуги 2004 – 2008 гг.

Среди других участков зоны имеется еще 5, в которых вероятность  $P(M \geq 7.7)$  на 2004 – 2008 гг. превышает ее средний уровень 3.6 – 4.2% в 1.5 – 3 раза. Это район п-ова Немуро (участок 1,  $P=11.1\%$ ), Средние Курилы и о. Онекотан (участки 7, 8, 9, где  $P=11.6, 9.4, 8.1\%$  соответственно), и Камчатский залив (участок 15,  $P=5.9\%$ ) (рис. 1, табл. 2, 3).

В остальных 9-ти участках вероятность  $P(M \geq 7.7)=0.2 - 4.4\%$ , т.е. равна средней или во много раз меньше ее (рис. 1, 2, табл. 1 – 4). Среднее значение этой вероятности для 9 спокойных участков равно 1.3%.

Прогнозируемые значения величины  $P(M \geq 7.7)$  получены при условии, что в Курило-Камчатской зоне в течение 5 лет в среднем происходит одно землетрясение с  $M \geq 7.7$ , и что сумма  $P(M \geq 7.7)$  для всех участков равна 100%. С вероятностью 0.8 она заключена в пределах 69 – 145% [19]. Это показывает, что если даже уровень сейсмичности всей Курило-Камчатской дуги будет соответствовать нижнему значению указанного интервала 69 – 145%, то вероятность разрушительного землетрясения силой до 9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском будет равна 17%, в 4.4 раза превышая среднюю.

Приведенные оценки вероятности разрушительных землетрясений с  $M \geq 7.7$  еще раз подтверждают полную необходимость неотложных мер по подготовке Камчатки к разрушительным землетрясениям в дополнение к постановлениям и распоряжениям Совмина СССР (1986 – 1991 гг.) и Правительства РФ (2001 г.).

Следует отметить, что приведенные вероятности  $P(M \geq 7.7)$  одновременно являются долгосрочным прогнозом вероятности возникновения цунами в разных местах Курило-Камчатской дуги.

Метод долгосрочного сейсмического прогноза на основе «сейсмических брешей» и сейсмического цикла может применяться и во многих других регионах мира. Успешный долгосрочный прогноз места землетрясения 16.05.1968 г.,  $M=7.9$  [20], рассмотренный выше ретроспективный прогноз землетрясения 25.09.2003 г. возле о. Хоккайдо подтверждают применимость этого метода для еще одного высокосейсмичного района, сходного с Курило-Камчатским по характеру сейсмического процесса, – Японских островов.

Состояние, развитие, итоги применения рассматриваемого метода в 1965 – 2000 гг. рассмотрены в обобщающей работе [19]. В данной статье отметим ряд тех направлений исследований, необходимость которых была подтверждена опытом работ 2001 – 2003 гг. При этом не затрагиваются связанные с методом исследования «сейсмического сценария» форшоков и сильных афтершоков землетрясений с  $M \geq 7.7$ , которые используются для краткосрочного прогноза таких землетрясений и прогноза их афтершоков с  $M \geq 6$  [17 и др.].

Наиболее важными данными рассматриваемого метода являются выделение вероятных мест следующих сильнейших землетрясений, «сейсмических брешей», оценка их относительной опасности и прогноз вероятности возникновения сильнейших землетрясений в них. Прогнозы составляются на ближайшие 5 лет (в некоторых случаях на 10 и более лет) для участков сейсмогенной зоны, площади которых близки по размерам к областям очагов сильнейших землетрясений и равны 5 – 20, в среднем  $11 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ .

Появление III заключительной стадии сейсмического цикла в «брешах» выявляется по аномалиям параметров  $A_{10}$ ,  $D$  и  $B$ , значения которых осредняются по 5-летним интервалам времени. Для дальнейшего совершенствования метода, кроме технических улучшений, нужны уточнение используемых предвестников, поиск новых предвестников, исследование закономерностей сейсмичности на III стадии сейсмического цикла, в том числе, особенностей ее поведения во внутренних и внешней зонах очагов сильнейших землетрясений, изучение сейсмических затиший, форшоковых активизаций и других явлений [7 - 9 и др.].

Важно продолжить сопоставление данных рассматриваемого метода с данными других видов долгосрочного и среднесрочного сейсмических прогнозов для Камчатки и всей Курило-Камчатской дуги. Такое сопоставление может повышать надежность прогнозов и способствовать развитию метода. В частности, с этой целью в течение длительного времени ведется сопоставление с результатами прогнозов по алгоритму M8 [3, 18 и др.]. Прогнозы по этому методу даются для больших участков сейсмогенной зоны (размерами 660 км и более) для пятилетних интервалов времени. Отсутствие или появление периодов повышенной вероятности землетрясений с  $M \geq 7.5$  может использоваться при оценке относительной опасности «сейсмических брешей», а также при оценке уровня суммарной вероятности сильнейших землетрясений  $P(M \geq 7.7)$  в больших звеньях Курило-Камчатской дуги.

Во втором разделе статьи была рассмотрена ретроспективным образом возможность дать долгосрочный сейсмический прогноз для землетрясения с  $M_s = 8.1$ , произошедшего 25.09.2003 г. у восточного побережья о. Хоккайдо около края полосы прогноза, данного для Курило-Камчатской дуги на 2001 – 2005 гг. (участок 1 на рис. 1). В этом участке около п-ва Немуро находится «сейсмическая брешь», и вероятность сильнейшего землетрясения в прогнозе на 2001 – 2005 гг. оценивалась величиной  $P(M \geq 7.7) = 5.7\%$  [19], которая в была 1.5 раза больше средней.

Большой очаг землетрясения 25.09.2003 г. наложился на западную половину очага землетрясений 4.03.1952 г.,  $M = 8.3$ , на «сейсмическую брешь» между очагами этого землетрясения и землетрясения 16.05.1968 г.,  $M = 7.9$ , а также на полосу тихоокеанской сейсмогенной зоны, находящуюся между очагом землетрясения 4.03.1952 г. и побережьем о. Хоккайдо (рис. 1, 3, 4, 5). Примечательно, что в средней части области очага 25.09.2003 г. было сейсмическое затишье. Данный случай представляет собой интересный пример взаимосвязи областей очагов соседних сильнейших землетрясений.

При ретроспективном долгосрочном прогнозе полоса прогноза (рис. 1) была расширена и продолжена в область очагов 4.03.1952 г. и 25.09.2003 г. (рис 3, 4, 5). Ретроспективный анализ показал, что для участков 0 и 16 мог быть дан верный заблаговременный прогноз, так как для этих участков суммарная вероятность на 2001 – 2005 гг. составляла  $P(M \geq 7.7) = 29.6\%$  (табл. 5, рис. 5). Во всей сейсмогенной зоне Камчатки, Курильских островов и о. Хоккайдо такая вероятность была больше только в районе Авачинского залива и г. Петропавловска-Камчатского, где суммарная вероятность для участков 11б и 12б (рис. 1), на 2001 – 2005 гг. равнялась  $P(M \geq 7.7) = 38.5\%$  [19] (табл. 3). Этот важный пример напоминает о том, что целесообразно применять рассматриваемый метод в других регионах мира, где находятся сеймотектонические структуры, сходные с Курило-Камчатской дугой, зоны субдукции литосферных плит.

## Выводы

В заключение назовем наиболее важные результаты, приведенные в статье.

1. Построен долгосрочный сейсмический прогноз на 2004 – 2008 гг. (04.2004 – 03.2009 гг.) для Курило-Камчатской дуги по методу, основанному на закономерностях «сейсмических брешей» и сейсмического цикла в его форме, предложенной в 2000 г. [19].

2. Наибольшая, очень высокая вероятность сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  на глубинах 0 – 80 км в 2004 – 2008 гг. имеется в районе г. Петропавловска-Камчатского:

в Авачинском заливе, у берегов Южной Камчатки и в Кроноцком заливе. Вероятность возникновения землетрясений  $P(M \geq 7.7)$  и их сила в г. Петропавловске-Камчатском на эти годы равна соответственно:  $P=24.6\%$ ,  $I$  до 9 баллов;  $P=14.2\%$ ,  $I$  до 8 баллов;  $P=7.7\%$ ,  $I$  до 7 баллов. Суммарная вероятность того, что произойдет одно из трех возможных разрушительных землетрясений, равна 46.5%. В прогнозе на 2001 – 2005 гг. эта суммарная величина равнялась 50%. С вероятностью 0.8 средний уровень этих величин может меняться в обе стороны не более, чем в 0.69 – 1.45 раз [19].

Полностью сохраняется необходимость неотложным образом принимать необходимые меры по сейсмобезопасности.

3. Построенный прогноз может использоваться для долгосрочного прогноза цунами на 2004 – 2008 гг.

4. Ретроспективный анализ показал, что можно было дать верный долгосрочный сейсмический прогноз для сильнейшего землетрясения последнего десятилетия у берегов Хоккайдо, произошедшего 25.09.2003 г.,  $M_s=8.1$ .

Работа выполнена по Программе №13 фундаментальных исследований Президиума РАН «Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы», Направление 1, государственный контракт № 10002-251/П-13/191-405/110504-249 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН с Объединенным институтом физики Земли РАН, а также по проекту Государственной поддержки ведущих научных школ, грант № НШ -2294.2003-5.

#### Список литературы

1. Гусев А. А., Мельникова В. Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. №6. С. 55 - 63.
2. Зобин В. М., Левина В. И. Зависимость соотношения энергетического класса и магнитуды землетрясений Камчатско-Командорского региона от напряженного состояния // Вулканология и сейсмология. 1994. №4. С. 116 – 120.
3. 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.
4. Лутиков А. И. К построению соотношения между энергетическим классом и магнитудой  $M_s$  для землетрясений Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 1999. №6. С. 44 - 46.
5. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 536 с.
6. Ризниченко Ю. В. Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 7. С. 969 - 977.
7. Соболев Г. А. Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 3 - 12.
8. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003<sub>1</sub>. 270 с.
9. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика очага и среднесрочный прогноз землетрясений // Очерки геофизических исследований. К 75-летию Объединенного института физики Земли. М.: ОИФЗ РАН, 2003<sub>2</sub>. С. 11 – 20.
10. Соловьев С. Л., Соловьева О. Н. Скорость колебания земной поверхности в объемных волнах неглубокофокусных курило-камчатских землетрясений на расстояниях до 17 градусов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. №1. С. 37 - 59.
11. Соловьев С. Л., Соловьева О. Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1967. № 2. С. 37 - 50.
12. Федотов С. А. О закономерностях распределения сильных землетрясений

- Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. №36. С. 66 - 93.
13. Федотов С. А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской области // Проблема цунами. М.: Наука, 1967. С. 121 - 132.
  14. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121 - 150.
  15. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
  16. Федотов С. А., Чернышев С. Д., Чернышева Г. В., Викулин А. В. Уточнение границ очагов землетрясений с  $M \geq 7$ ... свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. 1980. №6. С. 52 - 67.
  17. Федотов С. А., Чернышева Г. В., Шумилина Л. С. Оценка сейсмической опасности землетрясений с  $M \geq 6$ , сопровождающих сильнейшие ( $M \approx 8$ ) тихоокеанские землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1993. №6. С. 3 - 12.
  18. 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 с  $M \geq 6$  // Вулканология и сейсмология. 1998. №6. С. 3 - 16.
  19. 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.
  20. Fedotov S. A., Gusev A. A., Boldyrev S. A. et al. Progress of Earthquake Prediction in Kamchatka // Tectonophysics. 1972. 14 (3/4) P. 279 - 286.
  21. Mogi K. Seismicity before and after large shallow earthquakes around Japanese islands // Tectonophysics. 1990. 175 P. 1 - 33.
  22. Mogi K. Some features of seismic activities before recent three large earthquakes in and around Hokkaido/ Possible precursory phenomena // Proceedings of the 9<sup>th</sup> Joint Meeting of the UJNR. Panel of Earthquake Prediction Technology. November, 1994. P. 1 - 23.