

УДК 557.341

**ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ  
НА IV 2011 – III 2016 гг.  
ВЕРОЯТНЫЕ МЕСТО, ВРЕМЯ И РАЗВИТИЕ СЛЕДУЮЩЕГО СИЛЬНЕЙШЕГО  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КАМЧАТКИ**

*Федотов С.А.<sup>1,2</sup>, Соломатин А.В.<sup>1</sup>, Чернышев С.Д.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, karetn@list.ru*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли РАН, г. Москва*

**Введение**

Долгосрочный сейсмический прогноз - одно из самых важных направлений исследований и работ по прогнозу и оценке сейсмической опасности. 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.

Курило-Камчатская дуга является наиболее сейсмичным регионом России. Сейсмичность достигает здесь наивысшего уровня, существующего на Земле. Сейсмологические наблюдения, ведущиеся на протяжении более ста лет, показали, что по своей сейсмичности Курило-Камчатская дуга, длина которой около 2100 км, является в первом приближении однородной протяженной структурой.

Более 40 лет назад при исследовании сейсмичности Курило-Камчатской сейсмогенной зоны С.А. Федотовым был выделен ряд основных пространственно-временных закономерностей, важнейшими из которых являются «сейсмические бреши» и «сейсмический цикл» сильнейших землетрясений. В 1965-1968 гг. на основе этих и некоторых других закономерностей для Курило-Камчатского региона, Северо-Восточной Японии и сходных с ними структур С.А. Федотовым был предложен метод долгосрочного сейсмического прогноза [3, 4]. Понятия «сейсмические бреши», «сейсмический цикл» и «долгосрочный сейсмический прогноз» стали применяться в сейсмологии [1, 10, 11].

В настоящее время по данному методу наряду с сейсмической опасностью прогнозируется ряд других важных характеристик сейсмичности Курило-Камчатской дуги. Полученные прогнозы сопоставляются с прогнозами на основе других методов (М8 и др.) [5, 8]. Прогнозы регистрируются в Совете Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов и еженедельно передаются в сообщениях этого Совета. В случае возникновения сильных землетрясений или при других значительных изменениях сейсмического процесса в рассматриваемой области составляются их обновления.

Приведенный ниже долгосрочный сейсмический прогноз на IV 2011 – III 2016 гг. дополнен независимыми уточнениями для наиболее сейсмически опасной в настоящее время Камчатской части Курило-Камчатской дуги.

Долгосрочные сейсмические прогнозы сильнейших землетрясений 1965-2005 гг. оправдывались с вероятностью 0.8-0.9 [5, 8, 9 и др.].

Метод может применяться в других регионах мира, имеющих сходные структуру, геодинамику и сеймотектонику. Последние примеры применения рассматриваемого метода в других регионах мира - построение ретроспективного долгосрочного сейсмического прогноза для Хоккайдского землетрясения 25.IX 2003 г.,  $M = 8.1$  [6], а также выделение в 2005 г. обширной сейсмической бреши вдоль восточного побережья о. Хонсю, заполнившейся 11.III 2011 г. гигантским очагом землетрясения с  $M = 9$ .

Построенные долгосрочные сейсмические прогнозы могут быть использованы для долгосрочного прогноза цунами.

Необходимо отметить высокую практическую значимость результатов работ по данному методу. Полученные на его основе данные явились обоснованием для принятия государственных заблаговременных мер по сейсмобезопасности, сейсмозащите и сейсмоусилению. В 1986-2001 гг. было принято шесть соответствующих Решений и Постановлений Правительства СССР, РСФСР и РФ [2]. В 2006 и 2007 гг. были даны три Поручения Президента РФ В.В. Путина, а в конце 2008 г. было дано

Поручение Президента РФ Д.А. Медведева по обеспечению сейсмобезопасности, проведению сейсмоусиления жилого фонда и объектов социальной сферы в Камчатском крае и выделению средств на эти цели из федерального бюджета. В 2009 г. Правительство РФ выделило такие средства Камчатскому краю и Сахалинской области на повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в 2009-2013 гг., и с конца 2010 г. начались интенсивные работы по обеспечению необходимого уровня сейсмобезопасности, сейсмоусиление жилых домов, а также новое сейсмостойкое строительство, в краевом центре – г. Петропавловск-Камчатский [8].

### **Основы метода долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова**

Основы метода, используемые закономерности и параметры, а также способы составления прогнозов приведены в [3, 4]. Метод непрерывно применяется, совершенствуясь со временем, 20 основных работ и обзор результатов 1962-2002 гг. приведены в монографии [2], последнее описание метода, его обоснование и способы расчета прогнозируемых величин даны в [5, 7, 8]. Оценка предыдущих прогнозов и прогноз на 2010-2015 гг. приведены в [8]. Ниже изложены лишь краткие сведения, необходимые для объяснения приведенных долгосрочных сейсмических прогнозов и их оценки.

Долгосрочные сейсмические прогнозы составляются на 5 следующих лет – средний период повторения сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясения во всей Курило-Камчатской дуге [2, 7] и обновляются через полгода или чаще, если происходят сильные землетрясения и существенно меняются параметры сейсмичности.

Исходной основой для составления долгосрочных сейсмических прогнозов являются данные о параметрах сейсмического процесса за предшествующие 5 лет. При этом наиболее сейсмически активная полоса Курило-Камчатской сейсмогенной зоны с глубинами очагов 0-80 км и шириной 100 км, делится в среднем на 20 участков длиной от 100 до 200 км, сравнимых по размеру с очагами сильнейших землетрясений.

К основным параметрам относятся:

- сейсмическая активность  $A_{10}(t)$  - нормированное число землетрясений энергетического класса  $K_S = 10$ ,  $M = 3.2$  в год на площади  $10^3 \text{ км}^2$ ;
- относительная величина сброшенной сейсмической энергии  $D(t) = E_2(t)/E_1$ , где  $E_2(t)$  – нормированная величина средней сейсмической энергии, определенной за предыдущий 5-летний интервал для данного участка, а  $E_1(t)$  – нормированная величина средней сейсмической энергии для всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и за весь период наблюдений.

Для выделенных участков на следующий 5-летний период прогнозируются, прежде всего, стадии сейсмического цикла (I – стадия афтершоковых процессов, II – стадия стабильного накопления упругой энергии, III – завершающая стадия, характеризующаяся значительным количеством накопленной энергии, активизацией, затишьями, высокой нестабильностью сейсмического процесса, форшоками). К наиболее вероятным местам следующих сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений относятся сейсмические бреши - участки, в которых таких землетрясений не было в течение последних 80 лет, так как установленная длительность сейсмического цикла равна  $140 \pm 60$  лет или  $120 \pm 50$  лет [2].

Для сейсмических брешей указываются максимальные возможные магнитуды сильнейших землетрясений. Для всех участков указывается их относительная опасность.

На основе усредненных данных о величине сейсмических параметров в зависимости от стадии сейсмического цикла прогнозируются сейсмическая активность  $A_{10}$  и магнитуды  $M$  землетрясений средней силы, ожидающихся с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15.

Важной прогнозируемой величиной данного метода является вероятность возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$  во всех участках дуги,  $P(M \geq 7.7)$ .

Вероятности  $P(M \geq 7.7)$  для участков дуги, проходящих I или II стадии сейсмического цикла, определяются по времени, прошедшему с начала цикла в участке и нормальному распределению длительности сейсмических циклов  $T_1 = 140 \pm 60$  лет или  $T_2 = 120 \pm 50$  лет.

Основой для определения величины  $P(M \geq 7.7)$  для участков, проходящих III, заключительную, стадию сейсмического цикла, являются оценки вероятности случайного появления наблюдаемых значений  $A_{10}$  и  $D$  на II (спокойной) стадии сейсмического цикла:  $P(A_{10})$ ,  $P(D)$ . Для уточнения прогноза используются также параметр  $A_{11}(t)$ , построенный аналогично  $A_{10}(t)$  для землетрясений класса  $K_S = 11$

( $M = 4.3$ ) по более продолжительным интервалам времени (10 - 15 лет), и соответствующая величина  $P(A_{11})$ . Обобщенной вероятностной оценкой служат величины:  $V(A_{10}, D) = P(A_{10}) \cdot P(D)$ ,  $V_1(A_{10}, D, A_{11}) = P(A_{10}) \cdot P(D) \cdot P(A_{11})$  или  $V_2(A_{10}, D, A_{11}) = (P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11}))/3$ . В среднем, чем меньше параметр  $V$ , тем больше величина  $P(M \geq 7.7)$  - вероятность возникновения сильнейшего землетрясения в рассматриваемой области [2].

Таким образом успешно выделяются 2-3 наиболее опасные сейсмические бреши Курило-Камчатской дуги.

#### **Долгосрочный сейсмический прогноз на IV 2011 – III 2016 гг.**

Ниже приведен долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на следующий пятилетний период, IV 2011 – III 2016 гг., построенный по данным региональных каталогов КФ и СФ ГС РАН за пятилетний период до 23 марта 2011 г. На рис. указаны вероятности землетрясений с  $M \geq 7.7$  для различных участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги. Погрешность определения указанных вероятностей для сейсмических брешей оценивается величиной 2-3 %.

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на IV 2011 – III 2016 гг. по всем 20 участкам, на которые разделена сейсмогенная зона у Курильских островов и Камчатки, заключаются в следующем.

Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  на период IV 2011 – III 2016 гг. остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловск-Камчатский:

- для южной Камчатки (участок 11б, рис.) вероятность землетрясения с  $M \geq 7.7$ ,  $P(M \geq 7.7)$ , имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 21.1 %;
- для Авачинского залива (участок 12б, рис.) вероятность возникновения землетрясения с  $M \geq 7.7$  на IV 2011 – III 2016 гг., имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский – 17.1 %;
- для юго-восточной части Кроноцкого залива (участок 13а, рис.) вероятность землетрясения  $M \geq 7.7$ , имеющего силу до 7 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 8.2 %.

Суммарная вероятность возникновения землетрясений с  $M \geq 7.7$ , имеющих силу 7-9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский на ближайшие пять лет, в трех наиболее опасных участках 11б, 12б, и 13а равна 46.4 %, рис.

Землетрясения, имеющие силу 7-8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, с меньшей вероятностью могут также произойти в участках 11а, 12а, 13б, рис.

**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. Петропавловск-Камчатский, таким образом, может достигать 53.6 % в период времени IV 2011 – III 2016 гг. При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловск-Камчатский землетрясения силой 9 баллов равняется 17.1 %, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 36.5 %.**

С вероятностью 7.0 % сильнейшее землетрясение в следующий пятилетний период также может произойти в Камчатском заливе (участок 15, рис.).

На Курильских островах высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (участки 6, 8 и 9, рис.) – общая вероятность сильнейшего землетрясения для них составляет 24.0 %. Наибольшая активность наблюдается на 8 участке. Значение вероятности сильнейшего землетрясения в нем на период IV 2011 – III 2016 гг. является третьим по величине для Курило-Камчатской дуги и оценивается величиной 11.2%.

Участок 1 возле п-ова Немуро (рис.) стал седьмым по степени опасности ( $P = 6.4$  % в период IV 2011 – III 2016 гг.).

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 %.

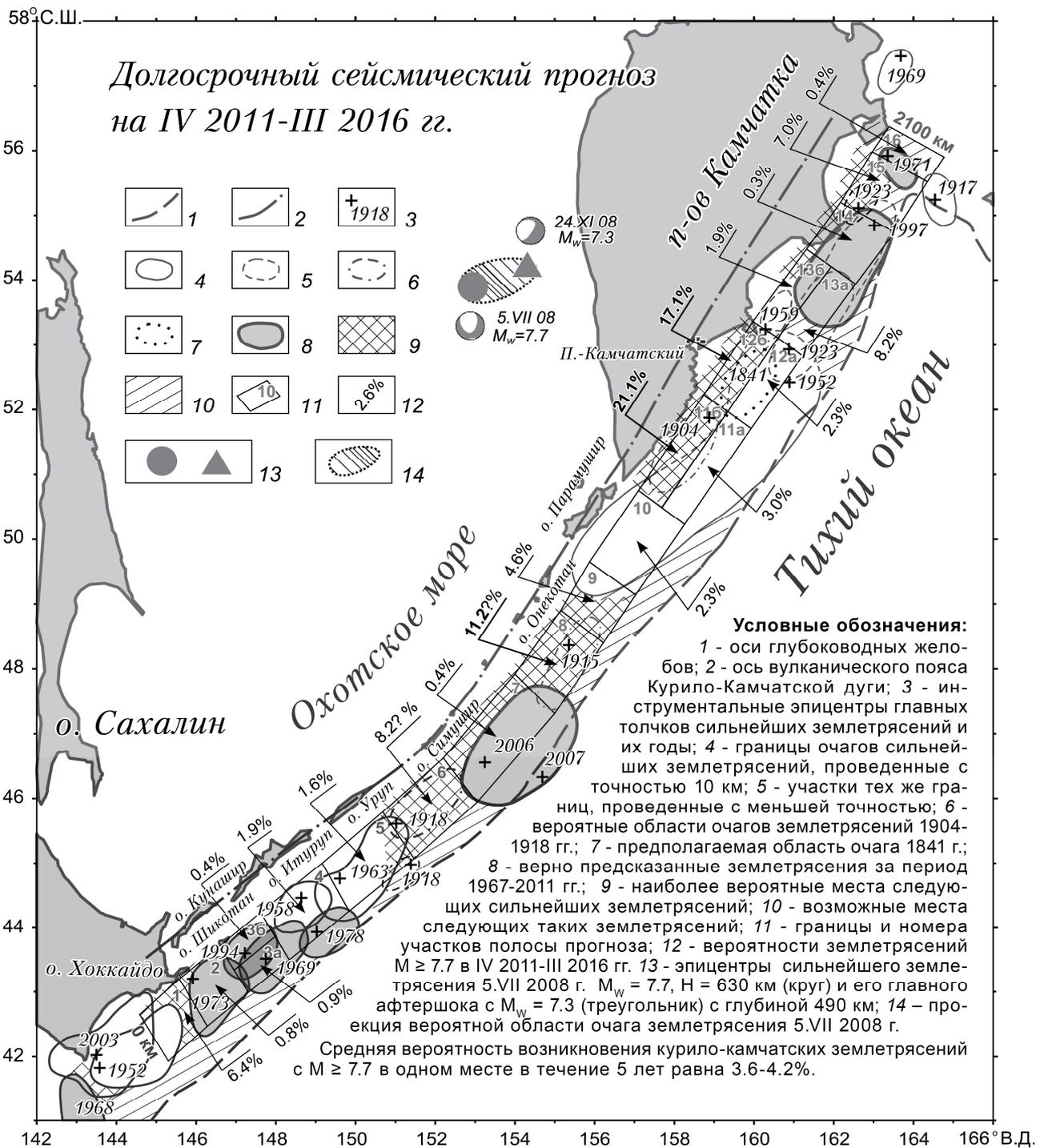


Рис. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1904-2011 гг. с  $M \geq 7.7$ ,  $H=0-80$  км, и вероятностей возникновения таких землетрясений в IV 2011-III 2016 гг. во всех участках полосы прогноза.

### Долгосрочный прогноз по сумме выделившейся сейсмической энергии

Предыдущий прогноз на основе суммы графиков выделившейся сейсмической энергии для Камчатки и Курильских о-вов был дан в работе [9] и успешно оправдался: 5.XII 1997 г. почти в середине предсказанного для Камчатки интервала времени (1995-2000 гг.) произошло Кроноцкое землетрясение с

$M = 7.8-7.9$ . В работе [8] приведены развитие этой методики и результаты ее применения для уточнения долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2010 – VIII 2015 гг.

На основе изучения графиков суммарной энергии Курило-Камчатских неглубоких землетрясений с  $M > 7.0$  как для всей сейсмофокальной зоны, так и для ее Курильской и Камчатской частей по отдельности, а также на основе распределения интервалов времени между сильнейшими землетрясениями региона сделаны следующие выводы.

- Наиболее вероятным местом следующего сильнейшего землетрясения с  $M \geq 7.7$ , имеющего глубину меньше 100 км, в пределах Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны является ее Камчатская часть, в которой с 1952 г. практически непрерывно накапливается сейсмическая энергия и в настоящее время ее суммарная величина эквивалентна землетрясению с  $M = 8.5$ .
- Ожидаемая магнитуда следующего землетрясения в этой части 7.7-8.0, но с учетом общей накопленной энергии не исключено и землетрясение с  $M = 8.5$ , охватывающее всю сейсмическую брешь, образованную участками 116 и 126 (рис.). Вероятное время такого землетрясения – XII 2011 г. при стандартной ошибке  $\pm 1$  год. Эти данные согласуются с долгосрочным сейсмическим прогнозом по методу С.А. Федотова, приведенным выше.
- Для Курильской части в настоящее время уже накоплена энергия, достаточная для землетрясения с магнитудой 8.0, и существует 50 % вероятность сильнейшего землетрясения в этом участке на следующие 5 лет. Данная оценка несколько завышена. Более точная оценка вероятности, согласно долгосрочному прогнозу, – около 33 %.

#### **Вероятные место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения на Камчатке**

Приведенные ниже результаты основаны на фактических сведениях о распределении сильнейших камчатских землетрясений 1952-2010 гг. по месяцам внутри года, а также о развитии в них последовательности форшоки - главный толчок - афтершоки. Результаты и выводы представлены в Российский экспертный совет по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (РЭС) МЧС и РАН, где зарегистрированы 15 марта 2011 г., а также в Совет ИВиС ДВО и КФ ГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов, где зарегистрированы 17 марта 2011 г.

- Подтверждается, что наиболее вероятным местом следующего сильнейшего землетрясения с  $M \geq 7.7$  на Камчатке является Авачинский залив и прилегающая акватория Южной Камчатки в районе г. Петропавловск-Камчатский.
- Сходное развитие сейсмичности в очагах четырех предыдущих сильнейших землетрясений Камчатки 1952, 1969, 1971 и 1997 гг. показывает с большой вероятностью, что разрыв и процессы в области очага следующего сильнейшего землетрясения тоже будут развиваться с севера на юг. В таком случае вероятно размещение форшоков в районе п-ва Шипунский, эпицентра главного толчка к югу от него и области очага и афтершоков в Авачинском заливе. Сила такого землетрясения может достигать 8-9 или 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский.
- По данным долгосрочного сейсмического прогноза, вероятность сильнейшего землетрясения в районе г. Петропавловск-Камчатский в IV 2011 – III 2016 гг. равна приблизительно 53.6 %. Приведенные данные о распределении в течение года сильнейших камчатских землетрясений 1952-2010 гг. показывают, что существуют внутригодичные вариации их опасности и что она сильно повышается в ноябре-декабре. Вероятность сильнейших землетрясений в районе г. Петропавловск-Камчатский может превышать 10% в ноябре-декабре 2011 и 2012 гг.
- При таком уровне опасности необходимо продолжать и развивать работы по сейсмическому прогнозу широким комплексом методов, а также исследования природы и механизма сейсмической деятельности в Курило-Камчатском и прилегающих регионах.
- Приведенные данные о наиболее опасных интервалах времени возникновения следующего сильнейшего землетрясения на Камчатке и вероятном развитии сейсмичности в его очаге следует учитывать при подготовке мер по сейсmobезопасности и выполнении работ по сейсмоусилению. Ослабление таких государственных мер, сокращение работ по сейсмоусилению недопустимы. Их актуальность стала еще более очевидной после катастрофического Японского землетрясения 11.III 2011 года.

## **Заключение. Выводы**

В работе представлены апробированный метод долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова, его основы, практические результаты непрерывного применения в Курило-Камчатском регионе на протяжении более 40 лет, их высокая социальная значимость. Показана применимость данного метода для других сходных по строению сеймотектонических структур. Приведены основные данные прогноза на период IV 2011 – III 2016 гг. Последние дополнены и уточнены на основе двух независимых методик, в первую очередь для Камчатской части Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, наиболее сейсмически опасной в настоящее время.

Основные выводы данной работы.

*В связи с очень высокой сейсмической опасностью необходимо вести усиленные наблюдения за сейсмичностью в участках 11, 12 и 13 (рис.), особенно в Авачинском заливе в районе г. Петропавловск-Камчатский (участок 12б). Необходимо продолжение работ по долгосрочному сейсмическому прогнозу, другим методам сейсмического прогноза и оценке сейсмического риска.*

*На следующие пять лет, IV 2011 – III 2016 гг., по-прежнему сохраняется очень высокий уровень сейсмической опасности в районе г. Петропавловск-Камчатский, где вероятность возникновения разрушительного землетрясения силой 7-9 баллов в эти годы остается равной 53.6 %. Вероятность того, что такое землетрясение будет иметь силу 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский и катастрофические последствия, равна 17.1 %.*

*В полной мере сохраняется необходимость неотложных мер по сейсмобезопасности, повышению устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае.*

## **Список литературы**

1. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 312 с.
2. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
3. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. С. 66-93.
4. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121-150.
5. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Афтершоки и область очага Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г.,  $M = 8.2$ ; долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2008 - III 2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 3-23.
6. 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.
7. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006-2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения 15 XI 2006 г.,  $M = 8.2$  // Вулканология и сейсмология. 2007. № 3. С. 3-25.
8. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010 – VIII 2015 гг., достоверность предыдущих прогнозов и их применение // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 1-25.
9. 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.
10. Mogi K. Earthquake Prediction. Tokyo, New York, London: Academic Press, 1985. 355 p. (Русский перевод: Могои К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.)
11. Sykes L.R. Aftershock zones of greatest earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and Aleutians // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. N 2. P. 8021-8041.