

Посвящается 50-летию начала детальных
сейсмологических наблюдений и исследований
на Камчатке, 1.XI 1961–1.XI 2011 гг.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА IX 2011–VIII 2016 гг.; ВЕРОЯТНЫЕ МЕСТО, ВРЕМЯ И РАЗВИТИЕ СЛЕДУЮЩЕГО СИЛЬНЕЙШЕГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КАМЧАТКИ С $M \geq 7.7$

© 2012 г. С. А. Федотов^{1,2}, А. В. Соломатин¹, С. Д. Чернышев¹

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,

e-mail: fedotov@ksnet.ru, alf55@mail.ru

² Институт физики Земли РАН

123810 Москва, Б. Грузинская ул., 10,

e-mail: karetn@list.ru

Поступила в редакцию 01.11.2011 г.

Рассматриваются результаты продолжения в 2010–2011 гг. работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, основанному на закономерностях сейсмических брешей и сейсмического цикла. Приводится прогноз на следующие 5 лет, IX 2011–VIII 2016 гг. для всех участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги. Для 20 участков предсказываются стадии сейсмического цикла, нормированное количество слабых землетрясений (A_{10}), магнитуды землетрясений средней силы, ожидаемых с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные возможные магнитуды и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$. Подтверждена полная необходимость продолжения неотложных работ по сейсмоукреплению в районе г. Петропавловск-Камчатский.

Независимые дополнительные оценки вероятных места, времени и развития следующего землетрясения на Камчатке с $M \geq 7.7$ получены при рассмотрении однотипного развития последовательностей форшоков, главных толчков и афтершоков трех последних сильнейших землетрясений Камчатки: 22.XI 1969 г., 15.XII 1971 г. и 5.XII 1997 г.

Гигантское землетрясение Тохоку, 11.III 2011 г., $M_W = 9$ ($M = 8.9$), заполнило сейсмическую брешь, выделенную в прогнозе для северо-восточной Японии, данном в 2005 г.

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-Камчат-

ская 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 брешы” 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 [Федотов, 1965, 1968, 2005]. Понятия “сейсмические брешы”, “сейсмический цикл” и “долгосрочный сейсмический прогноз” стали

применяться в сейсмологии [Соболев, 1993; Sykes, 1971; Mogi, 1988].

Метод непрерывно применяется, совершенствуясь со временем. 14 основных работ по этому методу и обзор результатов 1962–2002 гг. приведены в [Федотов, 2005]. В последней работе, приведенной в этой книге, даны прогноз на 2001–2005 гг. и описание метода по состоянию на 2002 г. [Федотов, Чернышев, 2002]. Оценка предыдущих прогнозов и прогноз на 2004–2008 гг. даны в работе [Федотов и др., 2004]. Последние описания метода и прогнозы на 2006–2015 гг. приведены в работах [Федотов и др., 2007, 2008, 2011].

В настоящее время по этому методу прогнозируется ряд важных характеристик сейсмичности Курило-Камчатской дуги на следующие пять лет, которые названы в разделе 1.

Полученные прогнозы сопоставляются с прогнозами на основе других методов (М8 и др.) [Федотов, 2005; Федотов и др., 2008, 2011].

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.

Долгосрочные сейсмические прогнозы сильнейших землетрясений 1965–2005 гг. оправдывались с вероятностью 0.8–0.9 [Федотов, Чернышев, 1987; Федотов и др., 2008, 2011] и др.

Метод может применяться в других регионах мира, имеющих сходную структуру, геодинамику и сейсмотектонику. Последними примерами применения рассматриваемого метода в других регионах мира является построение ретроспективного долгосрочного сейсмического прогноза для Хоккайдского землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$, данное в [Федотов и др., 2004], а также выделение в 2005 г. обширной сейсмической брешы вдоль восточного побережья о. Хонсю, заполнившейся 11.III 2011 г. гигантским очагом землетрясения с $M_w = 9$ ($M = 8.9$).

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 6 соответствующих Решений и Постановлений Правительства СССР, РСФСР и РФ [Федотов, 2005]. 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 и новое сейсмостойкое строительство в краевом центре – г. Петропавловск-Камчатский [Федотов и др., 2011].

В данной работе рассматриваются следующие основные вопросы.

В разделе 1 приводится долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на следующие 5 лет, IX 2011–VIII 2016 гг. Предыдущие такие прогнозы давались на IX 2010–VIII 2015 гг. [Федотов и др., 2011] и на IV 2011–III 2016 гг. При сдвиге интервала прогноза на год объем исходных данных меняется на 20%. Предсказывается на IX 2011–VIII 2016 гг. уровень сейсмичности во всех участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, отмечаются его сохранение либо изменения в течение последних лет.

В разделе 2 рассматривается однотипное развитие сейсмического процесса во время трех последних сильнейших землетрясений Камчатки – Озерновского, 22.XI 1969 г., $M = 7.7$, Усть-Камчатского, 15.XII 1971 г., $M = 7.8$, и Кроноцкого, 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$. Эти материалы дают независимые дополнения к приведенному долгосрочному прогнозу. Они показывают вероятные место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения на Камчатке.

В разделе 3 приводятся примеры успешного применения рассматриваемого метода долгосрочного сейсмического прогноза в других регионах мира – прогноз мест трех сильнейших японских землетрясений, включая гигантское землетрясение Тохоку 11.III 2011 г., $M = 8.9$. Отмечается влияние этого землетрясения на сейсмичность Курило-Камчатской дуги.

В Заключении содержатся краткое обсуждение результатов и главные выводы работы.

1. ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА IX 2011–VIII 2011 гг.

1.1. Основы используемого метода долгосрочного сейсмического прогноза и прогнозируемые величины

Основы метода, используемые закономерности и параметры, а также способы составления

прогнозов приведены в работах [Федотов, 1965, 1968, 2005]. Последнее описание метода, его обоснование и способы расчета прогнозируемых величин даны в работах [Федотов и др., 2004, 2007, 2008, 2011]. Оценка предыдущих прогнозов и прогноз на IX 2010—VII 2015 гг. приведены в работе [Федотов и др., 2011]. Ниже изложены лишь краткие сведения, необходимые для объяснения приведенных далее долгосрочных сейсмических прогнозов и их оценки.

Долгосрочные сейсмические прогнозы составляются на 5 следующих лет — средний период повторения сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений во всей Курило-Камчатской дуге [Федотов, 2005; Федотов и др., 2007] 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, рис. 1а.

К основным параметрам относятся:

- сейсмическая активность $A_{10}(t)$ — нормированное число землетрясений энергетического класса $K_S = 10$, $M = 3.6$ в год на площади 10^3 км^2 , K_S определяется по [Федотов, 1972];
- 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 восемь характеристик сейсмичности, табл. 1, 3. Прежде всего, прогнозируются стадии сейсмического цикла (I — стадия афтершоковых процессов, II — стадия стабильного накопления упругой энергии, III — завершающая стадия, характеризующаяся значительным количеством накопленной энергии, активизацией, затиханиями, 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 ± 60 лет или 120 ± 50 лет [Федотов, 2005]. Для сейсмических брешей указываются

максимальные возможные в них 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, $P(M \geq 7.7)$. Величина $P(M \geq 7.7)$ имеет два значения: она равна вероятности того, что следующее землетрясение возникнет в данном участке; одновременно она является приближенной оценкой возникновения такого землетрясения здесь в течение следующих 5 лет, так как они повторяются на Курило-Камчатской дуге в среднем раз в 5 лет [Федотов, 2005; Федотов и др., 2007, 2008, 2011].

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 $V_2(A_{10}, D, A_{11}) = (P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11}))/3$. Вероятность возникновения сильнейшего землетрясения в рассматриваемой области $P(M \geq 7.7)$ пропорциональна величине $(1-V)$ и длине участка [Федотов, 2005; Федотов и др., 2011 и др.].

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

1.2. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011—VIII 2016 гг. (по оценкам на сентябрь 2011 г.)

Прогноз составлен на следующие пять лет, IX 2011—VIII 2016 гг., в обновление предыдущего такого прогноза, составленного 14.IV 2011 г. на IX 2011—III 2016 гг. Исходные данные взяты из региональных каталогов КФ и СФ ГС РАН

Рис. 1. 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 IX 2011–VIII 2016 гг. во всех участках полосы прогноза (а); рой землетрясений 4–19.III 2011 г. и последовавшие землетрясения (б).

а: 1 – номер участка; 2 – инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 – границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 – участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 – вероятные области очагов землетрясений 1904–1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6 – 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 у Хоккайдо 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 13 – вероятности землетрясений $M \geq 7.7$ в IX 2011–VIII 2016 гг., табл. 3; 14 – области очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 15 – эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период 25.VIII 2006–24.VIII 2011 гг., меньший кружок, соответствует $M = 5.0–5.9$, больший – $M = 6.0–6.7$, $H < 80$ км; 16 – рой землетрясений 4–19.III 2011 г.; 17 – эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период 25.VIII 2010–24.VIII 2011 гг., $M = 5.5–6.2$, $H < 80$ км, заштрихованные кружки соответствуют эпицентрам землетрясений произошедшим до землетрясения Тохоку 11.III 2011 г., $M = 8.9$.

б: 18 – эпицентры землетрясений роя 4–19.III 2011 г. с M от 3.3 (маленький кружок) до 5.2 (большой кружок) и последовавшие землетрясения с $M = 5.7$ и 5.6.

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

сильными из них [Федотов, 2005; Федотов и др., 2011] и др.

Табл. 2 построена на основе параметра A_{11} , отражающего нормированное число землетрясений средней силы ($K = 11–12$, $M = 4.3–4.9$) [Федотов и др., 2008].

Свойства трех указанных прогностических параметров, а также основные характеристики их сейсмических циклов, определенные по последним данным, приведены в работе [Федотов и др., 2008].

В табл. 3 приведены данные о вероятностях землетрясений с $M \geq 7.7$ для сейсмических брешей сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, рассчитанные по графикам сейсмического цикла параметров A_{10} , D и A_{11} . Данные этой таблицы являются наиболее взвешенными оценками прогнозируемой сейсмической опасности.

В табл. 1 и 3 для сравнения показаны также вероятности землетрясений с $M \geq 7.7$ и относительная опасность сейсмических брешей, которые были получены при предыдущем долгосрочном сейсмическом прогнозе на IV 2011–III 2016 гг.

На рис. 1а представлена карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг. На нем показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$, произошедших в предыдущий 5-летний период, VIII 2006–VIII 2011 гг. На рис. 1а нанесен также рой землетрясений 4–19.III 2011 г., происходивший за неделю до и неделю после сильнейшего землетрясения Тохоку (северо-восточная Япония) 11.III 2011 г., $M = 8.9$, и предположительно являющийся откликом на него в одном из наиболее опасных участков Курило-Камчатской сейсмогенной зоны. На карте-врезке 1б нанесены также эпицентры последовавших за роем землетрясений 20.III 2011 г., $M = 5.7$, и 26.VII 2011 г., $M = 5.6$.

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2011–VIII 2016 гг. по всем 20 участкам, на которые разделена сейсмогенная зона у Курильских островов и Камчатки (см. рис. 1, табл. 3), заключаются в следующем.

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

– для южной Камчатки (участок 11б, рис. 1) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 19.5%;

– для Авачинского залива (участок 12б, рис. 1) вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ на IX 2011–VIII 2016 гг., имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, – 17.4%;

– для юго-восточной части Кроноцкого залива (см. рис. 1, участок 13а) вероятность землетрясения $M \geq 7.7$, имеющего силу до 7 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 8.2%. Однако, в этом участке не исключено некоторое завышение вероятности вследствие влияния афтершоков Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$.

Суммарная вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$, имеющих силу 7–9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском на ближайшие пять лет, в трех наиболее опасных участках 11б, 12б, и 13а равна 45.0% (см. рис. 1, табл. 3).

Землетрясения, имеющие силу 7–8 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, с меньшей вероятностью могут также произойти в участках 11а, 12а, 13б (см. рис. 1, табл. 3).

Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в участках 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б, которые могут иметь силу 7–9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, таким образом, может достигать 52.2% в период времени IX 2011–VIII 2016 гг. (см.

Таблица 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг. ($N \leq 80$ км), построенный по параметрам A_{10} и D

Уча- сток №	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2006–2011 гг. (VIII 2006–VIII 2011 гг.)				Прогноз на IX 2011–VIII 2016 гг.						Вероят- ная оче- редность		
			Ста- дия	$P(A)$	$P(D)$	$V = P(A) \times$ $\times P(D)$	$A_{10}(P \sim 0.7)$		M			$P(M \geq 7.7)\%$			
							A_{10}	$A_{10} \pm \sigma$	$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$			M_{MAX}	
1	0–100	Мыс Сириха – п-ов Немуро	III	0.84	0.99	0.84	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	4.1	(3.4)	7
2	100–200	П-ов Немуро – о-в Зеленый	II				1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.8	(0.8)	
3a	200–300	О-в Шикотан, Ю–В	II				1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		0.9	(0.9)	
3б	200–300	О-в Шикотан, С–З	I				2.1 → 1.4	1.2–4.5	6.0	6.4	6.9		0.4	(0.4)	
4	300–450	О-в Итуруп	II				1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.9	(1.9)	
5	450–600	Пролив Фриза – о-в Урул	II				1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.6	(1.6)	
6	600–750	Мыс Кастрикум – пр. Буссоль	III?	0.75	0.99	0.75	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.4?	(8.7?)	4?
7	750–950	О-в Симулир – пролив Крузен- штерна	I				7.5 → 2.6	10.6–4.6	6.2	6.7	7.2		0.4	(0.4)	
8	950–1100	О-в Шиашкотан	III?	0.75	0.64	0.48	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	19.8?	(16.1?)	2?
9	1100–1200	О-в Онекотан – пролив 3-й Ку- рильский	III	0.80	0.99	0.80	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	5.0	(4.0)	6
10	1200–1350	О-в Парамушир – мыс Лопатка	II				1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.3	(2.3)	
11a	1350–1550	Юг Камчатки, Ю–В	II				0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		3.0	(3.0)	
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С–З	III	0.74	0.97	0.72	1.3–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	14.3	(25.2)	3
12a	1550–1700	Зал. Авачинский – п-ов Шигун- ский, Ю–В	II				1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		2.3	(2.3)	
12б	1550–1700	Зал. Авачинский – п-ов Шигун- ский, С–З	III	0.54	0.73	0.39	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	23.1	(19.6)	1
13a	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю–В	III?	0.99	0.99	0.99	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	0.5	(0.7)	8
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С–З	II				2.6	1.7–3.9	5.9	6.4	6.9		1.9	(1.9)	
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	I				2.1 → 1.4	1.2–4.5	6.0	6.5	7.0		0.3	(0.3)	
15	1950–2050	Зал. Камчатский	III?	0.71	0.98	0.70	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	7.6	(6.1)	5
16	2050–2100	П-ов Камчатский	II				0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		0.4	(0.4)	
Оценка критических значений вероятностей				0.062	0.308	0.019								$\Sigma = 100$	

Примечание. Даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на IX 2011–VIII 2016 гг. Для всех 20 участков дуги указываются вероятные стадии сейсмического цикла. Индексом III отмечены те участки, в которых землетрясения с $M \geq 7.7$ не происходили в течение последних 80 лет и где значительна вероятность прихода заключительной, III стадии сейсмического цикла. Знаками вопроса отмечены те из участков, в которых вероятность такого события меньше. $P(A)$, $P(D)$ и V – вероятности случайного появления величин A_{10} , D и их сочетания на II стадии сейсмического цикла; 1–В – величина, показывающая относительную опасность сейсмических брешей; A_{10} – сейсмическая активность; $P \sim 0.8$, 0.5 , 0.15 – вероятности землетрясений с $M=5.7-7.2$; M_{MAX} – максимальная возможная магнитуда; $P(M \geq 7.7)$ – прогнозируемые вероятности сильнейших землетрясений (пояснения в тексте). Значения вероятности $P(M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их величинам на IV 2011–III 2016 гг. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6-4.2\%$.

Таблица 2. Оценки вероятности P_{11} землетрясений с магнитудой $M \geq 7.7$ Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг. ($H \leq 80$ км), полученные по параметру A_{11} для сейсмических брешей

Участок №	Δ , км	Район	P_3^{11} ($M \geq 7.7$)%	Вероятная очередность
1	0–100	Мыс Сириха – п-ов Немуро	10.5 (4.1)	3 (7)
6	600–750	Мыс Кастрикум – пр. Буссоль	6.3 (9.4?)	6 (4?)
8	950–1100	О-в Шиашкотан	6.0 (19.8?)	7 (2?)
9	1100–1200	О-в Онекотан – пролив 3-й Курильский	4.5 (5.0)	8 (6)
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С–З	16.5 (14.3)	2 (3)
12б	1550–1700	Залив Авачинский – п-ов Шипунский, С–З	19.6 (23.1)	1 (1)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю–В	10.2 (0.5)	4–5 (8)
15	1950–2050	Залив Камчатский	10.2 (7.6)	4–5 (5)
			$\Sigma = 83.8$ (83.8)	

Примечание. Цифры в скобках – соответствующие оценки $P(M \geq 7.7)$, а также вероятная очередность, определенные по параметрам A_{10} и D , из табл. 1. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6–4.2\%$. Разница в оценках вероятности P и очередности зависит от того, что параметры A_{10} и D определяются по данным за предыдущие 5 лет, а параметр A_{11} – за предыдущие 15 лет. Значения P_3^{11} ($M \geq 7.7$) могут быть завышены в участках 6, 8 и 13а из-за влияния происшедших в них форшоковых и афтершоковых процессов Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, и Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8$.

табл. 3). При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловске-Камчатском землетрясения силой 9 баллов равняется 17.4%, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 34.8%.

По предшествующему прогнозу, данному на IV 2011–III 2016 гг., вероятности землетрясений в г. Петропавловск-Камчатский силой 7–9, 9 и 7–8 баллов равны 53.6%, 17.1% и 36.5% соответственно. Таким образом, сейсмическая опасность для г. Петропавловск-Камчатский остается на прежнем очень высоком уровне.

Другим опасным местом вероятного сильнейшего землетрясения на Камчатке является район Камчатского залива, участок 15 (см. рис. 1, табл. 3). Вероятность сильнейшего землетрясения $P(M \geq 7.7)$ равна здесь 7.5% и является 6-й по величине среди сейсмических брешей Курило-Камчатской дуги.

На Курильских островах высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (см. рис. 1 – 6, 8 и 9 участки, табл. 3) – общая вероятность сильнейшего землетрясения для данного района составляет 24.6%. В участках 6 и 8 находятся концы главных разрывов Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.IX 2006 г., $M = 8.2$ (см. рис. 1). Наибольшая активность наблюдается на 8 участке. Значение вероятности сильнейшего землетрясения в нем на период IX 2011–VIII 2016 гг. является третьим по величине во всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоне и оценивается величиной 11.9%.

Участок 1 возле п-ова Немуро (см. рис. 1, табл. 3) является седьмым по степени опасности ($P(M \geq 7.7) = 6.6\%$ в период IX 2011–VIII 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%.

Значимой активизации сейсмического процесса в пределах полосы прогноза всей Курило-Камчатской дуги за последние полгода не отмечено. Однако необходимо отметить вероятную связь роя землетрясений 4–19.III 2011 г. напротив Авачинского залива (см. рис. 1а, 1б), не входящего в полосу прогноза, и гигантского землетрясения в районе Тохоку, северо-восточная Япония, 11.III 2011 г., $M = 8.9$. Расстояние между эпицентром главного толчка землетрясения Тохоку и названным роём равно 2100 км.

Данный рой произошел вблизи глубоководного желоба напротив мыса Шипунский и включал в себя 12 неглубоких ($H < 50$ км) землетрясений с $M = 4.5–5.4$. Сложное строение тектонических структур в данном районе, а также его высокая сейсмическая опасность по данным долгосрочного прогноза могли обусловить связь этих двух событий. Рой землетрясений мог быть удаленным форшоковым и афтершоковым процессом, сопровождавшим землетрясение Тохоку 11.III 2011 г., $M = 8.9$, и показателем очень высоких накопленных напряжений в участке сейсмогенной зоны, прилегающем к Авачинскому заливу.

Сходное заключение было сделано ранее при составлении долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IV 2011–III 2016 гг. (по данным на март 2011 г.). В нем был отмечен рой землетрясений с максимальными магнитудами $M = 5.4$, который произошел в марте

Таблица 3. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг. ($N \leq 80$ км), полученный с использованием параметров A_{10} , D , A_{11}

Уча- сток	Δ , км	Район	Прогноз на IX 2011–VIII 2016 гг.										Вероятная очеред- ность			
			Статия цикла и ее оценка по данным 2006–2011 гг. (VIII 2006–VIII 2011 гг.)		$A_{10}(P \sim 0.7)$		$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	M_{MAX}	$P(M \geq 7.7)\%$					
			$P_1 = P(A_{10})$	$P_2 = P(D) = P(A_{11})$	$P_3^{II} = P(A_{11})$	$B = (P_1 \times P_2 \times P_3)$						A_{10}		$A_{10}\sigma$		
1	0–100	Мыс Сириха – п-ов Немуро	III	0.84	0.99	0.55	0.46	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	6.6	(6.4)	7
2	100–200	П-ов Немуро – о-в Зеленый	II					1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.8	(0.8)	
3а	200–300	О-в Шикотан, Ю-В	II					1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		0.9	(0.9)	
3б	200–300	О-в Шикотан, С-З	I					2.1 → 1.4	1.2–4.5	6.0	6.4	6.9		0.4	(0.4)	
4	300–450	О-в Итуруп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.9	(1.9)	
5	450–600	Пролив Фриза – о-в Урууп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.6	(1.6)	
6	600–750	Мыс Кастрикум – пр. Буссоль	III?	0.75	0.99	0.73	0.55	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	8.4?	(8.2?)	4?
7	750–950	О-в Симушир – пр. Крузенштерна	I					7.5 → 2.6	10.6–4.6	6.2	6.7	7.2		0.4	(0.4)	
8	950–1100	О-в Шикотан	III?	0.75	0.64	0.74	0.36	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	11.9?	(11.2?)	3?
9	1100–1200	О-в Онекотан – пр. 3-й Курильский	III	0.80	0.99	0.81	0.65	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	4.3	(4.6)	8
10	1200–1350	О-в Парамушир – мыс Лопатка	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.3	(2.3)	
11а	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		3.0	(3.0)	
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.74	0.97	0.30	0.21	1.3–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	19.5	(21.1)	1
12а	1550–1700	Зал. Авачинский – п-ов Шипунский, Ю-В	II					1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		2.3	(2.3)	
12б	1550–1700	Зал. Авачинский – п-ов Шипунский, С-З	III	0.54	0.73	0.16	0.06	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	17.4	(17.1)	2
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.99	0.99	0.56	0.56	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	8.2	(8.2)	5
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-З	II					2.6	1.7–3.9	5.9	6.4	6.9		1.9	(1.9)	
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	I					2.1 → 1.4	1.2–4.5	6.0	6.5	7.0		0.3	(0.3)	
15	1950–2050	Залив Камчатский	III?	0.71	0.98	0.56	0.39	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	7.5	(7.0)	6
16	2050–2100	П-ов Камчатский	II					0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		0.4	(0.4)	
		Оценка критических значений вероятностей		0.062	0.308	0.354	0.007								$\Sigma = 100.0$	

Примечание. См. обозначения в табл. 1. Выделены оценки вероятности сильнейших землетрясений ($P(M \geq 7.7)$) и их очередность. Значения вероятности ($P(M \geq 7.7)$) в скобках соответствуют их предельным величинам на IV 2011–III 2016 гг. Средняя вероятность возникновения Курило-Камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6–4.2%. Фигурными скобками показаны наиболее опасные районы – район г. Петропавловск-Камчатский и район Средних Курильских островов. Серым фоном выделены наиболее опасные участки.

2011 г. в районе м. Шипунский на границе очагов гигантских камчатских землетрясений 3.II 1923 г., $M \geq 8.3$, и 4.XI 1952 г., $M = 8.5$ (см. рис. 1а, 1б). Землетрясения роя не относятся к полосе прогноза, тем не менее, высока вероятность связи данного роя с подготовкой сильнейшего землетрясения в наиболее опасном в настоящее время участке 12б – районе Авачинского залива.

Самым значительным сейсмическим событием Камчатского региона в предыдущее пятилетие было сильнейшее глубокое землетрясение в Охотском море 5.VII 2008 г., $M = 7.7$, $H = 630$ км [Федотов и др., 2011]). В течение нескольких лет после таких землетрясений согласно исследованиям К. Моги [Mogi, 1985] существует повышенная вероятность неглубоких сильнейших землетрясений. На основе этого сохраняется заключение о том, что вероятность возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ в районе г. Петропавловск-Камчатский в течение 2011, а также 2012 гг. может быть еще выше ее наибольшей величины в Курило-Камчатском регионе, которая определена по долгосрочному сейсмическому прогнозу на 2011–2016 гг. для Авачинского залива и Тихоокеанского побережья Южной Камчатки (см. рис. 1, участки 11б, 12б, табл. 3).

Важным дополнением к используемому методу долгосрочного сейсмического прогноза является исследование суммарной выделившейся сейсмической энергии как для изучаемого региона в целом, так и для его отдельных участков [Федотов, 2005; Федотов и др., 1987]. Графики зависимости суммарного выделения сейсмической энергии от времени дают важную информацию об уровнях максимального накопления такой энергии и предельном времени ее выделения при сильнейших землетрясениях. В работе [Федотов и др., 1987] был дан успешно оправдавшийся впоследствии прогноз для Камчатского участка Курило-Камчатской сейсмогенной зоны. В середине предсказанного пятилетнего интервала, 1995–2000 гг., на Камчатке произошло сильнейшее Кроноцкое землетрясение 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$.

Последние исследования накопленной сейсмической энергии в пределах Курило-Камчатской дуги [Федотов и др., 2011] показали, что наибольшая ее часть, соответствующая землетрясению с $M = 8.5$, и по силе воздействия на прибрежную область Камчатки сопоставимого с землетрясением Тохоку в районе северо-восточной Японии 11.III 2011 г., $M = 8.9$, в настоящее время накоплена в пределах Камчатского участка дуги. Такое землетрясение вблизи Авачинского залива соответствует наихудшему вероятному сценарию. Однако, более вероятно, что следующее сильнейшее землетрясение в данном районе будет иметь магнитуду $M = 7.7–8.0$ [Федотов и др., 2011].

2. ВЕРОЯТНОЕ МЕСТО, ВРЕМЯ И РАЗВИТИЕ СЛЕДУЮЩЕГО СИЛЬНЕЙШЕГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА КАМЧАТКЕ С $M \geq 7.7$

Долгосрочный сейсмический прогноз, приведенный в предыдущем разделе, дополняется для Камчатки данными о внутригодовом распределении сильных Камчатских землетрясений в 1952–2010 гг. и закономерном развитии ряда последних сильнейших камчатских землетрясений с глубинами до 100 км, которые произошли в 1969–1997 гг.: Озерновское землетрясение 22.XI 1969 г., $M = 7.7$, Усть-Камчатское землетрясение 15.XII 1971 г., $M = 7.8$, Кроноцкое землетрясение 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$ (табл. 4)².

Курило-Камчатский сейсмический пояс представляет собой активнейшую сейсмогенную зону, протягивающуюся на 2100 км вдоль Курильских островов и Камчатки. Сильнейшие землетрясения с $M \geq 7.7$ на глубинах до 100 км повторяются во всей зоне в среднем через 5 лет. Такой сеймотектонический процесс развивается в ней равномерно после длительного перерыва в последовательности этих землетрясений, наблюдавшегося со времени Камчатского землетрясения 3.II 1923 г., $M \geq 8.3$, до гигантского Камчатского землетрясения 4.XI 1952 г., $M = 8.5$ [Федотов, 2005; Федотов и др., 2011] и др.

С 1952 г. на Камчатке произошли пять следующих сильнейших землетрясений (см. табл. 4), [Атлас ..., 1962; Новый каталог ..., 1977; Токарев и др., 1973; Федотов, Кондратенко, 1975; Левина и др., 2003₂ и др.]:

- 4.XI 1952 г. – Камчатское гигантское землетрясение и цунами от мыса Шипунский на Камчатке до о-ва Парамушир на Северных Курилах, $M = 8.5$;
- 4.V 1959 г. – землетрясение у мыса Шипунский и в южной части Кроноцкого залива, $M = 7.7$;
- 22(23).XI 1969 г. – Озерновское землетрясение в Беринговом море у северного окончания Курило-Камчатской дуги, $M = 7.7$;
- 15.XII 1971 г. – Усть-Камчатское землетрясение в северной части Камчатского залива в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, $M = 7.8$;

² Основные результаты работы С.А. Федотова “Вероятные место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения на Камчатке с магнитудой $M = 7.7$ и более (дополнение к долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги на IV 2011–III 2016 гг.)” были представлены 15 марта 2011 г. Российскому экспертному совету по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (РЭС) МЧС и РАН и были зарегистрированы 18 марта 2011 г. Советом Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и Камчатского филиала ГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов.

Таблица 4. Сильнейшие землетрясения Камчатки 1952–1997 гг. с $M \geq 7.7$, $H \leq 100$ км и их афтершоки с $M \geq 7$

Название	Год	Число, месяц	Час, мин	φ°	λ°	Глубина очага, h, км	M	I, балл	Источник
Камчатское	1952	4.XI	16.58	52.3	161.0	10–40	8.5	7, Южная Камчатка	[Новый каталог ..., 1977] и др.
афтершок*	1952	29.XI	08.22	52.8	159.2	40	7.3		»
афтершок	1952	11.XII	08.58	48.7	154.8	90	6.9		»
афтершок	1953	4.IX	07.23	50.4	157.0	60	7.3		»
афтершок	1953	11.X	13.08	49.8	156.0	70	7.4		»
афтершок	1953	10.XI	23.40	50.9	157.6	60	7.0		»
Шипунское	1959	4.V	07.15	53.1	160.3	20	7.6–7.7	8, Петропавловск-Камчатский	»
афтершок	1959	18.VI	15.31	53.9	160.5	15	7.0	9, Жупаново	»
Озерновское	1969	22.XI	23.09	57.8	163.7	20–30	7.7	8, п-ов Озерной	[Токарев и др., 1973] и др.
Петропавловское	1971	24.XI	19.35	52.8	159.4	100–125	7.2–7.3	7, Петропавловск-Камчатский	[Федотов, Кондратенко, 1975] и др.
Усть-Камчатское	1971	15.XII	08.29	55.9	163.4	30	7.8	8, Усть-Камчатск	»
Кроноцкое	1997	5.XII	11.26	54.8	162.0	30	7.8–7.9	7–8, п-ов Кроноцкий	[Левина и др., 2003 ₁] и др.

Примечание. Даты и моменты землетрясений указаны по Гринвичскому времени. Приведены координаты гипоцентров главных толчков землетрясений 1952–2010 гг. с $M \geq 7.7$, $H \leq 100$ км, а также гипоцентров их афтершоков с $M \geq 7$. Дополнительно приведены сведения о разрушительном Петропавловском землетрясении 24.XI 1971 г., $H = 100$ км, $M = 7.2$.

* Землетрясение 29.XI 1952 г., $M = 7.3$ могло иметь силу более 6 баллов в Петропавловске-Камчатском, но макросейсмических данных нет. Вероятно, что ошибка координат больше 50 км.

• 5.XII 1997 г. – Кроноцкое землетрясение восточнее п-ова Кроноцкий, $M = 7.8–7.9$.

Положение очагов этих пяти землетрясений показано на рис. 1 в разделе 1.

Рассмотрим далее внутригодовое распределение во времени сильнейших камчатских землетрясений 1952–2010 гг.

4 из 5 сильнейших камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$, которые были на глубинах до 100 км в 1952–2010 гг., Камчатское 4.XI 1952 г., $M = 8.5$, Озерновское 22.XI 1969 г., $M = 7.7$, Усть-Камчатское 15.XII 1971 г., $M = 7.8$, и Кроноцкое 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$, а также усиление мощного роя афтершоков гигантского землетрясения 1952 г. происходили в ноябре–декабре. Крупнейшее предыдущее землетрясение исторического времени на Камчатке произошло 17.X 1737 г., а его сильнейший афтершок с $M = 7.8$ был 4.XI 1737 г. [Новый каталог ..., 1977]. Эти и другие фактические данные показывают, что вероятность возникновения сильнейших землетрясений возрастает на Камчатке в это время года. На основании этих данных можно ожидать с вероятностью 0.8, что следующее сильнейшее землетрясение с $M \geq 7.7$ на Камчатке также произойдет в ноябре–декабре.

Такое свойство сейсмичности Камчатки отмечалось в предыдущих исследованиях. Распределение сильнейших курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7 \frac{3}{4}$ в 1904–1963 гг. во времени и внутри года рассматривалось ранее в работе [Федотов, 1965, 2005]. В эти годы было 14 таких землетрясений, 5 из них произошли в октябре–ноябре.

Сходные результаты были получены при рассмотрении внутригодовой повторяемости сейсмического процесса для Тихоокеанского региона [Левин и др., 2005]. Использовался мировой каталог землетрясений 1966–1977 гг., очищенный от афтершоков. Показано, что в Камчатском субрегионе 8 из 13 землетрясений с $M_b \geq 6$ такого каталога произошли в ноябре–декабре.

По данным долгосрочного сейсмического прогноза вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в районе г. Петропавловск-Камчатский в период IX 2011–VIII 2016 гг. равна 52.2% или приблизительно 10% в год (см. табл. 3, раздел 1). При этом, судя по графикам накопления-сброса сейсмической энергии в 1952–2010 гг., их вероятность повышается к 2011–2012 гг. [Федотов и др., 2011]. При таких условиях вероятность возникновения сильнейших землетрясений в районе г. Петропав-

ловск-Камчатский может превышать 10% в ноябре-декабре 2011 и 2012 гг.

В дополнение к предыдущим долгосрочным сейсмическим прогнозам, [Федотов, 2005; Федотов и др., 2011] и раздел 1, рассмотрено развитие последовательностей форшоки – главный толчок – афтершоки и особенности сейсмотектоники и движений при пяти названных выше камчатских землетрясениях с $M \geq 7.7$, которые происходили с 1952 г. (см. табл. 4).

Развитие инструментальных сейсмологических наблюдений, а также динамика сейсмических процессов на Камчатке в 1897–1961 гг. рассмотрены в работе [Федотов, Багдасарова, 1974]. В этот период наблюдения за землетрясениями Камчатки вела редкая сеть постоянных сейсмических станций. Удачным обстоятельством было то, что в 1946–1952 гг. к сейсмической станции во Владивостоке, организованной в 1929 г., добавились постоянные станции в Ключах, 1947 г., Южно-Сахалинске, 1948 г., Углегорске на Сахалине, 1950 г., Петропавловске-Камчатском, 1951 г., в Курильске (о-в Итуруп) и Магадане, 1952–1953 гг., в Охе на Сахалине и Северо-Курильске (о-в Парамушир), 1958 г. [Атлас ..., 1962; Федотов, Багдасарова, 1974]. Благодаря этому в 1951–1961 гг. значительно возросли полнота каталога камчатских землетрясений и точность определения их координат и магнитуд по всей Камчатке и в очагах гигантского Камчатского землетрясения 4.XI 1952 г., $M = 8.5$, и Шипунского землетрясения 4.V 1959 г., $M = 7.6-7.7$.

Полнота и точность данных о землетрясениях Камчатки резко повысились в 1961–2011 гг. после организации и начала детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах 1.XI 1961 г., 50 лет тому назад [Федотов и др., 1964; Федотов, 1987, 2002] и др. В данной работе рассматриваются процессы развития сейсмичности в последовательности сильнейших камчатских землетрясений этого времени – 22.XI 1969 г., 15.XII 1971 г. и 5.XII 1997 г. (см. табл. 4), о которых имеются однородные данные детальных сейсмологических исследований.

Озерновское землетрясение 22(23).XI 1969 г., $M = 7.7$

22 ноября 1969 г. в 23 ч 09 мин по Гринвичу (11 ч 09 мин 23 ноября по местному времени), в западной части Берингова моря в районе п-ова и залива Озерной у северо-восточного побережья Камчатки произошло землетрясение с $M = 7.7$, вызвавшее сотрясение силой 8 баллов в ближайших пунктах побережья и породившее волны цунами высотой 10–15 м (рис. 2). Длина области очага, судя по размерам плотного роя афтершоков, происшедших в течение первых суток после

главного толчка, составляла 100 км. Это было самое сильное землетрясение на Камчатке после 4(5).V 1959 г., когда в районе п-ова Шипунского произошло землетрясение с $M = 7 \frac{3}{4}$ ($M = 7.6-7.7$) [Федотов и др., 1973].

Данные о сейсмичности Камчатки и Командорских островов в 1969 г. приведены в работе [Токарев и др., 1973]. Изучение Озерновского землетрясения и его последствий началось на следующий день после землетрясения. В работе [Федотов и др., 1973] рассмотрены сейсмотектоническая обстановка, инструментальные данные о предшествующей сейсмичности, главном толчке, форшоках и афтершоках, а также долгосрочный сейсмический прогноз наиболее вероятного места следующего сильнейшего землетрясения в Тихоокеанской фокальной зоне у берегов Камчатки.

На рис. 2 показаны данные о землетрясениях, которые произошли на Камчатке, в области стыка Курило-Камчатской и Алеутской дуг и в западной части Берингова моря в 1930–1969 гг. до Озерновского землетрясения 22.XI 1969 г. Южнее 56.5° с.ш. нанесены эпицентры землетрясений с $M \geq 7$ [Атлас ..., 1962], а севернее этой широты – эпицентры землетрясений с $M \geq 5$ и землетрясений 1964–1969 гг. с $K \leq 12$ ($M < 5$). Черным цветом выделены 6 предшествующих землетрясений 1969 г. и нанесены их порядковые номера. Показан эпицентр главного толчка, глубина которого была 20–30 км (см. табл. 4), и околнурена область афтершоков, которые произошли в течение первых 32 часов. На рис. 2 нанесены первые варианты областей очагов предыдущих землетрясений с $M \geq 7 \frac{3}{4}$. Позднее они были уточнены (см. рис. 1 и др.).

На рис. 3 показано развитие роя афтершоков в ноябре–декабре 1969 г. Его протяженность превысила 120 км к концу 1969 г.

Примечательная цепочка форшоков, которые произошли 10, 21 и 22.XI 1969 г. на перешейке п-ова Камчатка (см. рис. 2): землетрясения 1969 г. № 4, 5 и 6. Их глубины были 0–40 км, энергетические классы $K_S = 11.4, 10.6$ и 9.7 ($M = 4.5, 4.0$ и 3.5). Вероятно, что эта цепочка форшоков протянулась вдоль границы плит и точно показала ее положение.

Сейсмическая деятельность при Озерновском землетрясении развивалась следующим образом. 21–22.XI 1969 г. через перешеек на севере п-ова Камчатка протянулась названная цепочка форшоков. После них 22.XI 1969 г. в 150 км к юго-востоку от них около п-ова Озерной произошел главный толчок Озерновского землетрясения.

Рой афтершоков протянулся на 100 км далее на юг вдоль окончания Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, находящейся в западной части Берингова моря (см. рис. 2 и 3). В целом, в 1969 г. при

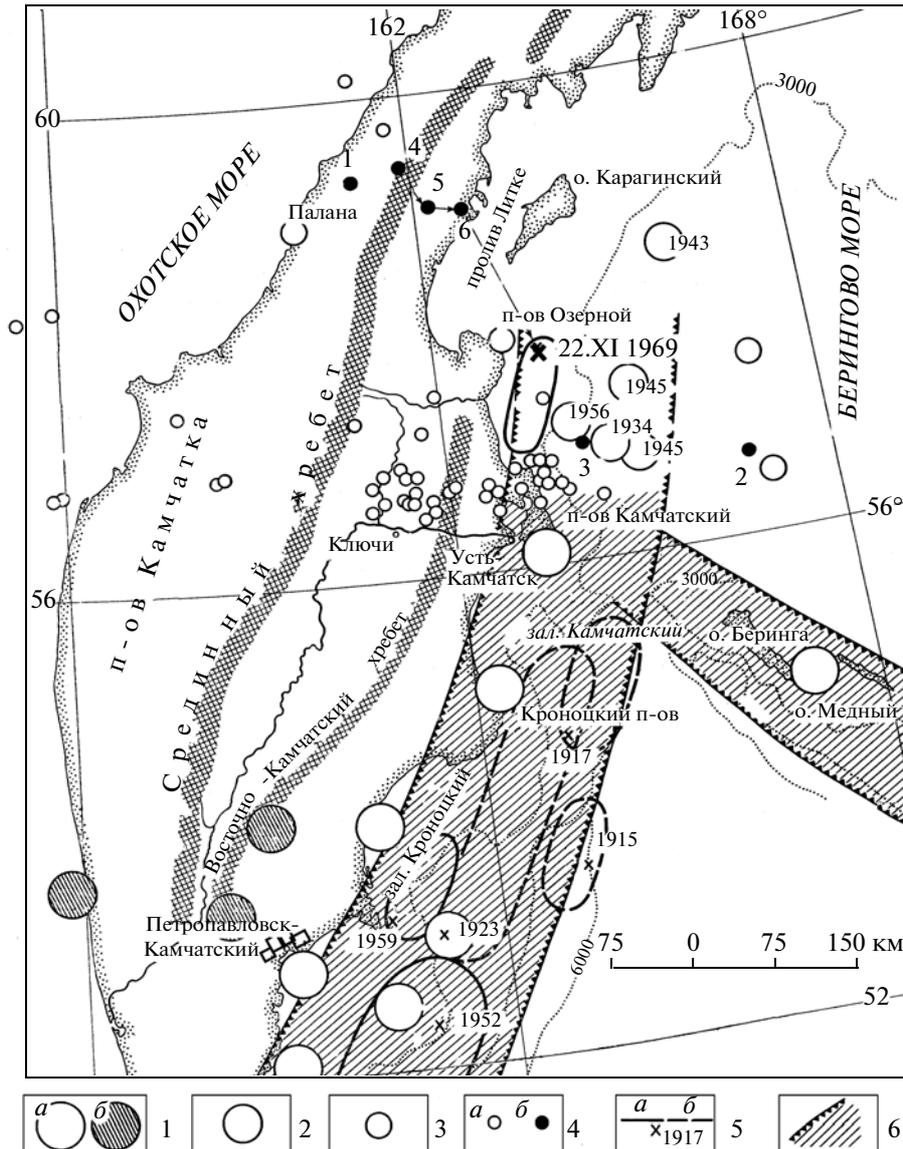


Рис. 2. Область стыка Курило-Камчатской и Алеутской сейсмогенных зон, очаг Озерновского землетрясения 22.XI 1969 г., $M = 7.7$ и карта эпицентров предшествовавших землетрясений 1930–1969 гг.

1 – эпицентры землетрясений с $7 \leq M \leq 7\frac{1}{2}$: *a* – неглубокие, *b* – глубже 70 км; 2 – эпицентры землетрясений с $6 \leq M < 7$; 3 – эпицентры землетрясений с $4\frac{3}{4} \leq M \leq 5\frac{3}{4}$; 4 – эпицентры землетрясений с $K \leq 12$ ($M \leq 5$): *a* – за 1964–1968 гг., неполные данные, *b* – за 1969 г. (см. текст); 5 – эпицентры и границы очаговых зон землетрясения с $M \geq 7\frac{3}{4}$: *a* – надежные, *b* – возможные; б – сейсмогенные зоны (пояснения в тексте).

Озерновском землетрясении произошли миграция сейсмичности и сеймотектонических движений на 300 км с севера на юг вдоль Камчатки.

Продолжение этих перемещений далее на юг произошло при Усть-Камчатском землетрясении 15.XII 1971 г.

*Усть-Камчатское землетрясение 15.XII 1971 г.,
M = 7.8, и его прогноз*

Озерновское землетрясение 22.XI 1969 г. произошло севернее основной сейсмогенной полосы

у берегов Камчатки, для которой регулярно даются долгосрочные сейсмические прогнозы, раздел 1 [Федотов, 2005 и др.], и такой прогноз не составлялся для западной части Берингова моря и района Озерновского землетрясения. Но повышение сейсмичности и миграция землетрясений, связанные с Озерновским землетрясением, подтвердили высокий уровень опасности сильнейших землетрясений в полосе прогноза в районе п-ова Камчатский, который прилегает с юга к области очага Озерновского землетрясения (см. рис. 1 и 2).

При обсуждении результатов исследований Озерновского землетрясения в работе [Федотов и др., 1973] отмечалось, что во многих случаях очаги сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса являются продолжением очагов предыдущих, и напоминалось, что по долгосрочному сейсмическому прогнозу [Федотов, 1968] район Камчатского залива и п-ова Камчатский является наиболее вероятным местом следующего землетрясения с $M \geq 7 \frac{3}{4}$ в Тихоокеанской фокальной зоне у берегов Камчатки. Был сделан вывод о том, что, вероятнее всего, такое землетрясение захватит территорию или континентальный склон п-ова Камчатский и прилегающую часть Камчатского залива [Федотов и др., 1973].

Такой прогноз подтверждало также то, что в январе–феврале 1969 г. в этом месте был рой землетрясений, 10 из которых ощущались в Усть-Камчатке. Два наибольших из них произошли 20.I 1969 г., $M = 5.8$ и 26.I 1969 г., $M = 6$ [Токарев и др., 1973; Новый каталог ..., 1978].

На основании названного долгосрочного сейсмического прогноза летом 1971 г. на южное побережье п-ова Камчатский Институтом вулканологии (ИВ) ДВНЦ АН СССР был отправлен геодезический отряд для производства нивелирных измерений по профилю, проходящему вдоль берега полуострова.

15.XII 1971 г. вблизи этого места южнее п-ова Камчатский произошло Усть-Камчатское землетрясение с $M = 7.8$ (см. табл. 4) [Федотов, Кондратенко, 1975; Гусев и др., 1975]. Оправдались дававшиеся долгосрочные сейсмические прогнозы [Федотов, 1968, 1974]. Землетрясение заполнило сейсмическую брешь, имевшуюся здесь в северо-восточном окончании Курило-Камчатской сейсмогенной зоны [Федотов, 1968, 1974 и др.] (см. рис. 1 и 2).

Усть-Камчатское землетрясение 15.XII 1971 г. произошло в области пересечения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, на сейсмичность которой влияют геодинамические и сеймотектонические процессы, происходящие в обеих дугах. Форшоки и афтершоки, механизм очага землетрясения, развитие сейсмических процессов в нем, данные о балльности землетрясения и последовавшем цунами рассмотрены в работах [Федотов, Кондратенко, 1975; Гусев и др., 1975] и др.

Эпицентр Усть-Камчатского землетрясения 15.XII 1971 г. оказался в центре предшествующего Усть-Камчатского роя землетрясений I–II 1969 г. [Токарев и др., 1973].

На рис. 4а, 4б, 4в показано положение и развитие роя афтершоков Усть-Камчатского землетрясения в его начале: 15–17, 17–19 и 19–31.XII 1971 г. по данным [Гусев и др., 1975; Федотов, Кондратенко, 1975].

15–17.XII 1969 г. рой афтершоков протягивался по простиранию Алеутской дуги, 17–19.XII – вдоль Курило-Камчатской дуги, а афтершоки 19–31.XII – вдоль обеих дуг. Основная масса афтершоков произошла южнее эпицентра главного толчка.

В 1972 г. наибольшая сейсмическая активность на Камчатке наблюдалась в эпицентре Усть-Камчатского землетрясения [Федотов и др., 1976].

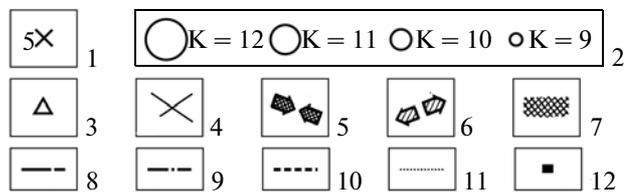
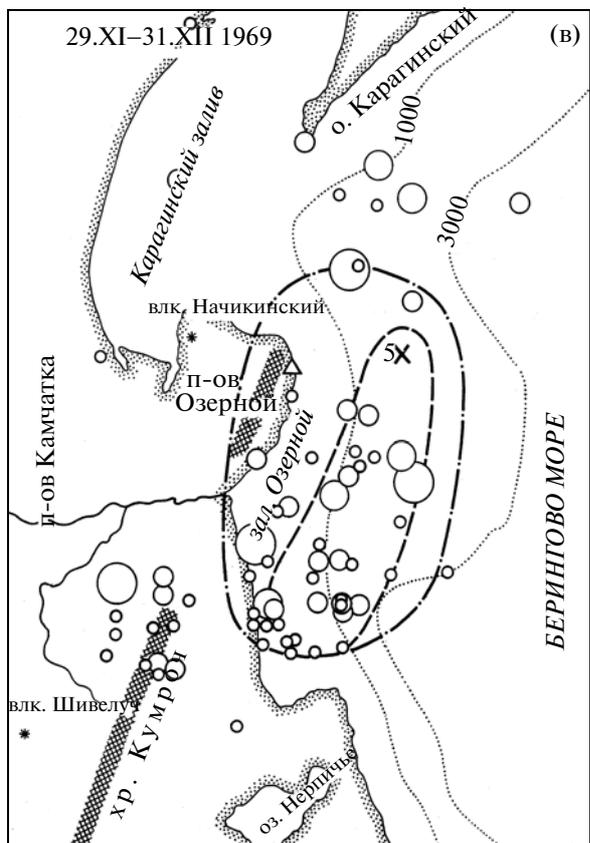
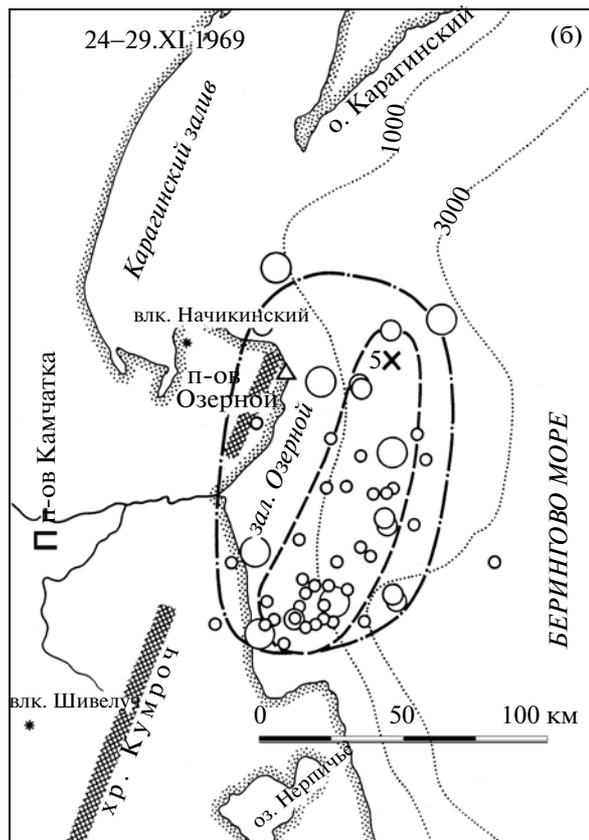
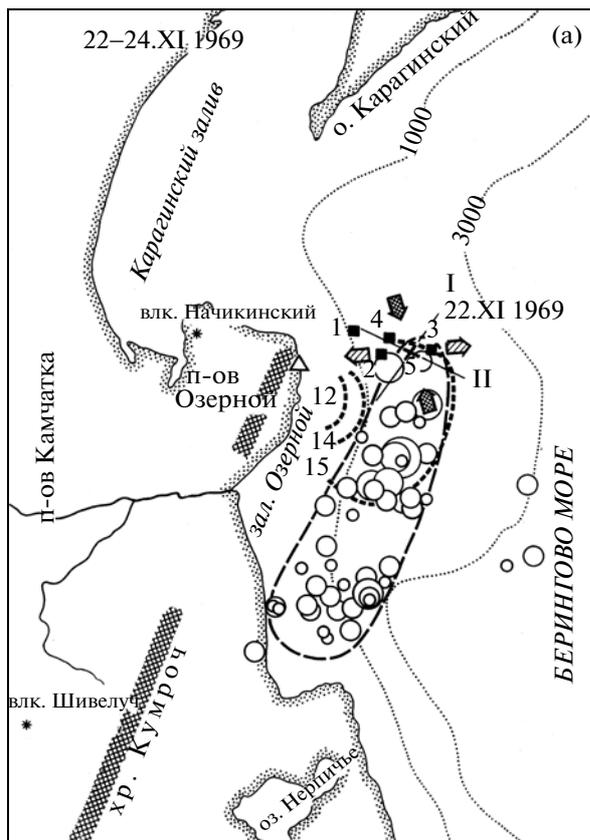
*Кроноцкое землетрясение 5.XII 1997 г.,
 $M = 7.8-7.9$*

Сильнейшее Кроноцкое землетрясение 5.XII 1997 г. было продолжением ряда предыдущих сильнейших Озерновского и Усть-Камчатского землетрясений 1969 и 1971 гг. Область его очага показана на рис. 1.

Успешный долгосрочный сейсмический прогноз Кроноцкого землетрясения, прогноз его сильных афтершоков с $M \geq 6$, и данные о развитии последовательности его форшоков и афтершоков приведены в статье [Федотов и др., 1998₂]. Результаты всестороннего изучения землетрясения, данные об его форшоках и афтершоках 1997–1998 гг. содержатся в работах [Левина и др., 2003₁, 2003₂, 2004].

На рис. 5 приведена карта эпицентров форшоков (2–5.XII 1997 г.), основного толчка и первого месяца афтершоков (5.XII 1997–4.I 1998 гг.) с $M \geq 3.5$ [Федотов и др., 1998₂]. Развитие сейсмического процесса снова происходило аналогичным образом: с севера на юг. Рой форшоков произошел близко от эпицентра основного толчка к северу от него. Эпицентр основного толчка находился в 50 км южнее роя форшоков. Мощная зона афтершоков протянулась на 250 км далее на юг. При этом была заполнена сейсмическая брешь у Кроноцкого полуострова и в северной части Кроноцкого залива, которая считалась вероятным местом следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ на Камчатке [Федотов и др., 1998₂].

Приведенные выше данные о последних сильнейших землетрясениях Камчатки, Озерновском 22.XI 1969 г., Усть-Камчатском 15.XII 1971 г. и Кроноцком 5.XII 1997 г. (см. табл. 4) показывают, что сейсмические процессы в их очагах развивались по одному типу. Цепочки и рои форшоков возникали в северной части областей очагов этих сильнейших землетрясений. Главные толчки происходили в роях форшоков или к югу от них. Мощные рои афтершоков распространялись на сотни км на юг от эпицентров главных толчков вдоль сейсмогенной зоны Камчатки. При этом очаги трех сильнейших землетрясений, Озерновского 22.XI 1969 г., Усть-Камчатского 15.XII 1971 г. и Кроноцкого 5.XII 1997 г., последовательно перемещались на юг, заполняя имевшиеся сейсмические



бреши (см. рис. 1 и 5 и др.). Показательно, что все эти землетрясения произошли в ноябре-декабре.

Вероятно, что такие сеймотектонические движения и перемещение сейсмичности продолжатся при следующем сильнейшем землетрясении на Камчатке. В этом случае, начало разрыва и форшоки следующего сильнейшего землетрясения расположатся, скорее всего, в районе п-ова Шипунский, а область его очага — в Авачинском заливе и у побережья Южной Камчатки (см. рис. 1 и 5).

Такой вывод, полученный независимым способом, подтверждает данные долгосрочного сейсмического прогноза о том, что наиболее вероятным местом следующего сильнейшего землетрясения в сейсмогенной зоне Камчатки являются прибрежная часть Авачинского залива, акватория Южной Камчатки и Южная часть Кроноцкого залива, участки 12б, 11б и 13а (см. рис. 1, 5, табл. 3), [Федотов и др., 2011] и раздел 1. Эти участки указаны стрелками на рис. 5. Вероятность возникновения такого землетрясения в участках 11б и 12б в 4.5 раза больше, чем в участке 13а.

Дополнительные сведения приводятся при обсуждении результатов.

3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДОЛГОСРОЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ СЕЙСМОГЕННОЙ ЗОНЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЯПОНИИ

Среди регионов мира, в которых существуют сходные с Курило-Камчатской дугой сеймотектонические условия, наиболее близким по сеймотектоническим условиям является участок Тихоокеанского сейсмического пояса, расположенный вдоль побережья северо-восточной Японии. Данный участок прилегает к Курило-Камчатской дуге и является ее продолжением. Начиная с 1965 г. долгосрочные сейсмические прогнозы составлялись несколько раз также для него.

Первым успехом используемого метода долгосрочного сейсмического прогноза был оправдавшийся прогноз места сильнейшего землетрясения именно в этом регионе — возле о-ва Хонсю, где 6.V 1968 г. сильнейшее землетрясение с $M = 7.9$ заполнило сейсмическую брешь восточнее северной части Хонсю, выделенную перед ним в 1965 г. [Федотов, 1965, 1974, 2005] (рис. 6).

25.IX 2003 г. у юго-восточного побережья о-ва Хоккайдо, около южного края области прогноза для Курило-Камчатской дуги, произошло следующее сильнейшее землетрясение с $M = 8.1$. Оно было самым сильным землетрясением Камчатки, Курильских островов и Хоккайдо после Кроноцкого землетрясения на Камчатке 5.XII 1997 г., $M = 7.8-7.9$. В связи с этим для данного района был построен ретроспективный прогноз на 2001–2005 гг. [Федотов и др., 2004], который показал, что для участков 0 и 1б (рис. 7) мог быть дан верный заблаговременный прогноз, так как для них суммарная вероятность $P(M \geq 7.7)$ на 2001–2005 гг. составляла 29.6%. Во всей сейсмогенной зоне Камчатки, Курильских островов и о. Хоккайдо такая вероятность была больше только в районе Авачинского залива и г. Петропавловск-Камчатский (38.5% в сумме для участков 11б и 12б) (см. рис. 7) [Федотов и др., 2004].

Построение также показало, что очаг сильнейшего землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$, не только занял самое опасное место в существовавшей к тому времени сейсмической бреши, но при этом через 50 лет охватил также значительную часть области очага предшествовавшего сильнейшего землетрясения 4.III 1952 г., $M = 8.3$ (см. рис. 7). Это существенная особенность данного землетрясения. В связи с этим можно отметить три случая значительного наложения очагов сильнейших землетрясений, происходивших через меньшие интервалы времени, (см. рис. 1): возле о. Итуруп (6.XI 1958 г., $M = 8.2$, и 24.III 1978 г., $M = 8.0$), возле о. Шикотан (11.VIII 1969 г., $M = 8.2$, и 4.X 1994 г., $M = 8.1$) [Федотов и др., 2004], а также возле о. Симушир (15.XI 2006 г., $M = 8.2$, и 13.I 2007 г., $M = 8.1$) [Федотов и др., 2008].

В 2005 г. в рамках проекта № 03-1-0-08-007 “Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги, продолжение прогноза катастрофических землетрясений, развитие метода и применение в других регионах мира” Направления 1 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №13 “Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы” был построен пробный сейсмический прогноз для северо-восточной Японии на 2005–2010 гг. К этому времени произошли изменения в той карте сейсмических брешей у побережья северо-восточной Японии, которая была составлена в 1965 г.

Рис. 3. Основной толчок и афтершоки Озерновского землетрясения 22.XI 1969 г., $M = 7.7$.

а — основной толчок и афтершоки с 23 ч 9 мин 22.XI 1969 г. до 7 ч 24.XI 1969 г., б — афтершоки с 7 ч 24.XI 1969 г. до 12 ч 29.XI 1969 г., в — афтершоки с 12 ч 29.XI 1969 г. до 31.XII 1969 г.

1 — положение главного толчка; 2 — эпицентры афтершоков: $K = 12$, $K = 11$, $K = 10$, $K = 9$; 3 — временная сейсмическая станция на м. Озерной; 4 — проекции двух вариантов плоскостей подвижки; 5 — направление оси сжатия; 6 — то же, растяжения; 7 — горные хребты; 8 — граница области, содержащей основную часть афтершоков на карте а; 9 — то же на карте б; 10 — изохроны цунами от устья реки Ольховая; 11 — изобаты, м; 12 — варианты эпицентра основного толчка.

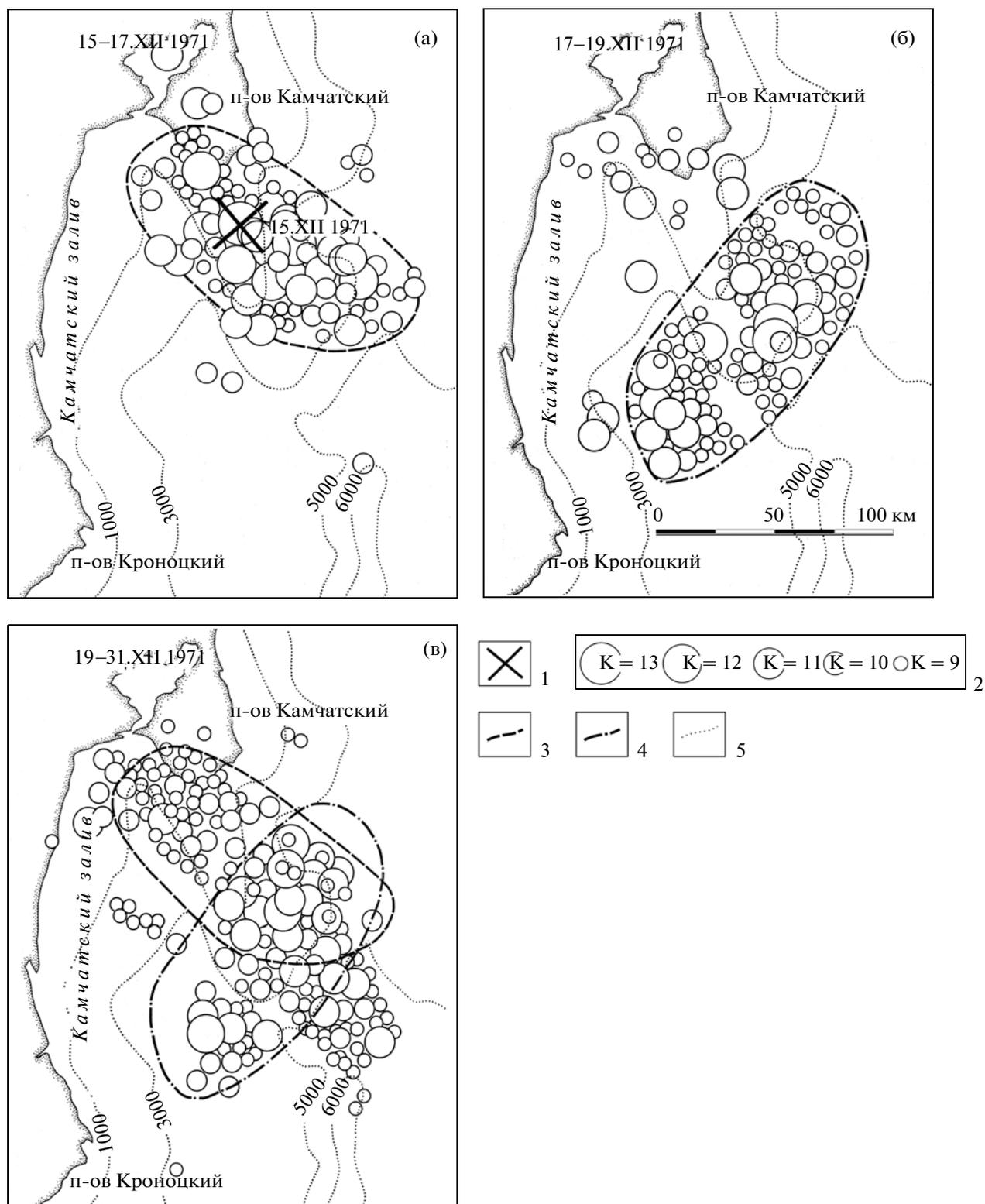


Рис. 4. Основной толчок и афтершоки Усть-Камчатского землетрясения 15.XII 1971 г., $M = 7.8$.

а – основной толчок и афтершоки с 8 ч 29 мин 15.XII 1971 г. до 8 ч 17.XII 1971 г.; б – афтершоки с 8 ч 17.XII 1971 г. до 8 ч 19.XII 1971 г.; в – афтершоки с 8 ч 19.XII 1971 г. до 24 ч 31.XII 1971 г.

1 – положение главного толчка; 2 – K , энергетические классы землетрясений, $K = \lg E(\text{Дж}) = 1.5 M + 4.6$; 3 – граница области, содержащей основную часть афтершоков на карте а; 4 – то же на карте б; 5 – изобаты, м.

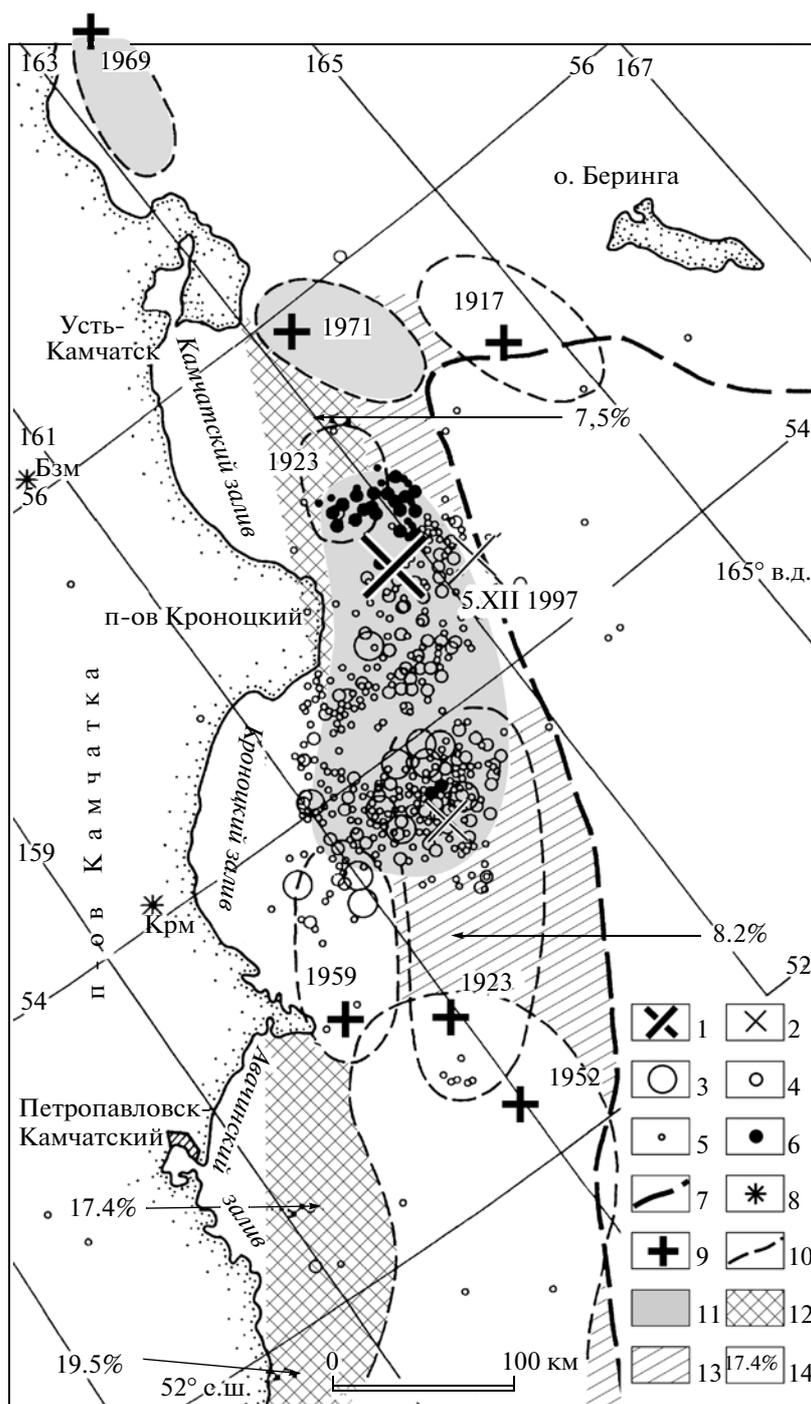


Рис. 5. Карта эпицентров форшоков (2–5.XII 1997 г.), основного толчка и афтершоков (5.XII 1997–4.I 1998 гг.) Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$, и наиболее вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7.7$.

Эпицентры землетрясений: 1 – основного толчка; 2 – с $6.5 \leq M \leq 7.4$; 3 – с $5.5 \leq M \leq 6.4$; 4 – с $4.5 \leq M \leq 5.4$; 5 – с $3.5 \leq M \leq 4.4$; 6 – эпицентры форшоков; 7 – ось глубоководного желоба; 8 – вулканы Безымянный (Бзм) и Карымский (Крм), извергавшиеся во время Кроноцкого землетрясения; 9 – эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$, происходивших до Кроноцкого землетрясения; 10 – границы областей их очагов; 11 – области очагов Озерновского, Усть-Камчатского и Кроноцкого землетрясений с $M \geq 7.7$ [Федотов и др., 1998], рис. 1; 12 – наиболее вероятные места следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$; 13 – возможные места таких землетрясений; 14 – вероятности возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ в наиболее опасных местах по прогнозу на IX 2011–VIII 2016 гг. (рис. 1, табл. 3).

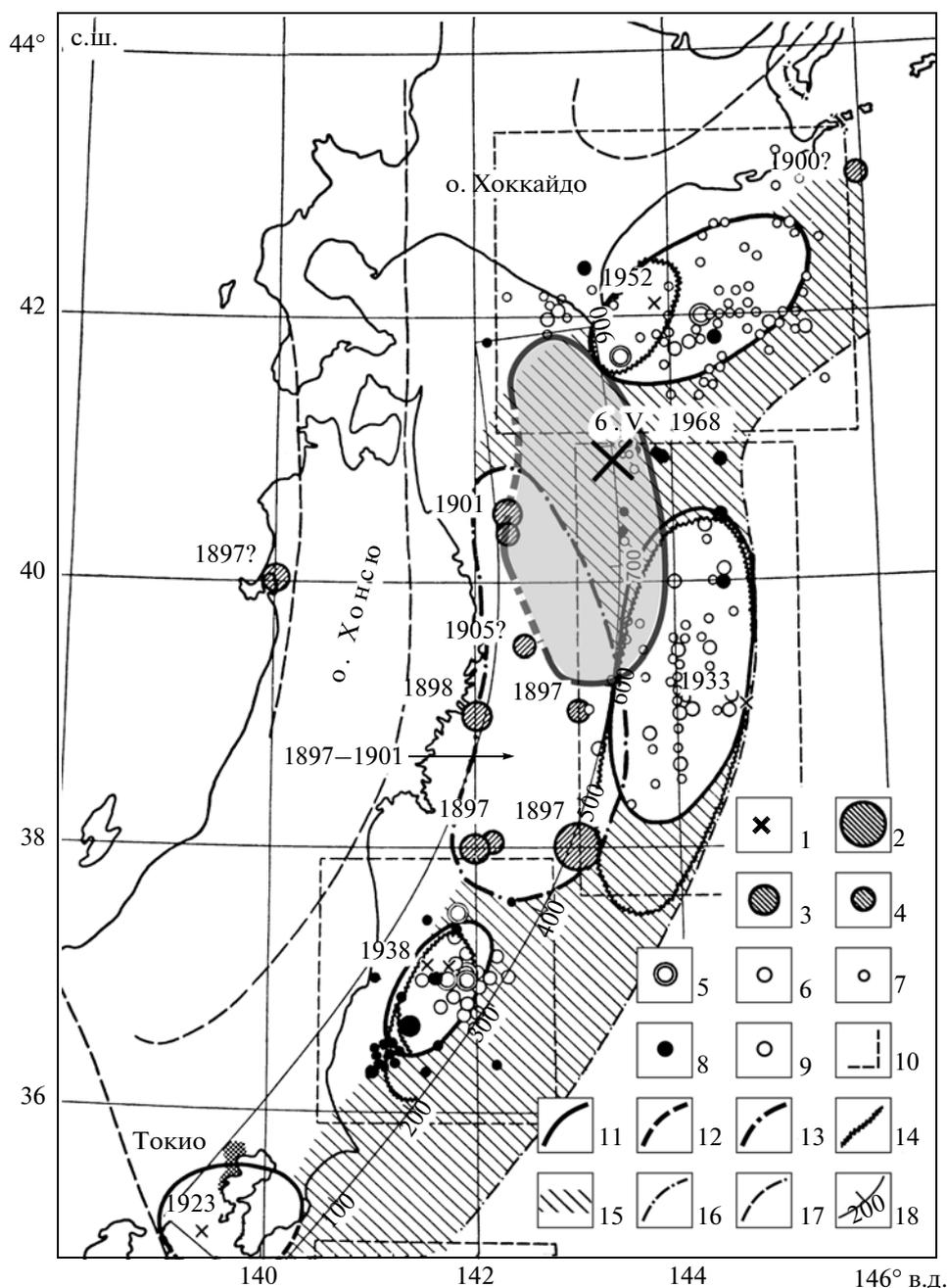


Рис. 6. Области очагов сильных землетрясений ($M \geq 7 \frac{3}{4}$) северо-восточной Японии в 1897–1963 гг. и вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7 \frac{3}{4}$ [Федотов, 1965]. Положение очага последовавшего землетрясения 6.V 1968 г., $M = 7.9$.

Инструментальные эпицентры землетрясений: 1 – сильнейших землетрясений 1923–1963 гг.; 2 – 1897–1905 гг. с $M = 8 \frac{1}{2} - 8 \frac{3}{4}$; 3 – $M = 8 - 8 \frac{1}{2}$; 4 – $M = 7 \frac{3}{4}$; эпицентры форшоков и афтершоков: 5 – $M \geq 7$; 6 – $M = 6.0 - 6.9$; 7 – $M = 5.0 - 5.9$; 8 – эпицентры форшоков; 9 – эпицентры афтершоков; 10 – границы областей, в которых нанесены все землетрясения за 1933, 1938, 1952 гг., включая форшоки и афтершоки; 11 – границы областей очагов сильных землетрясений; 12 – неуверенные участки границ областей очагов; 13 – возможная граница области землетрясений 1897–1901 гг.; 14 – границы областей возникновения цунами; 15 – вероятные места возникновения следующих сильных землетрясений; 16 – оси глубоководных впадин; 17 – оси вулканических поясов; 18 – линия отсчета расстояний вдоль континентального склона глубоководной впадины.

На рисунке нанесена также граница области очага (область очага выделена серым цветом) сильнейшего, $M = 7.9$, землетрясения, произошедшего в предсказанном месте 6.V 1968 г. [Федотов и др., 1980].

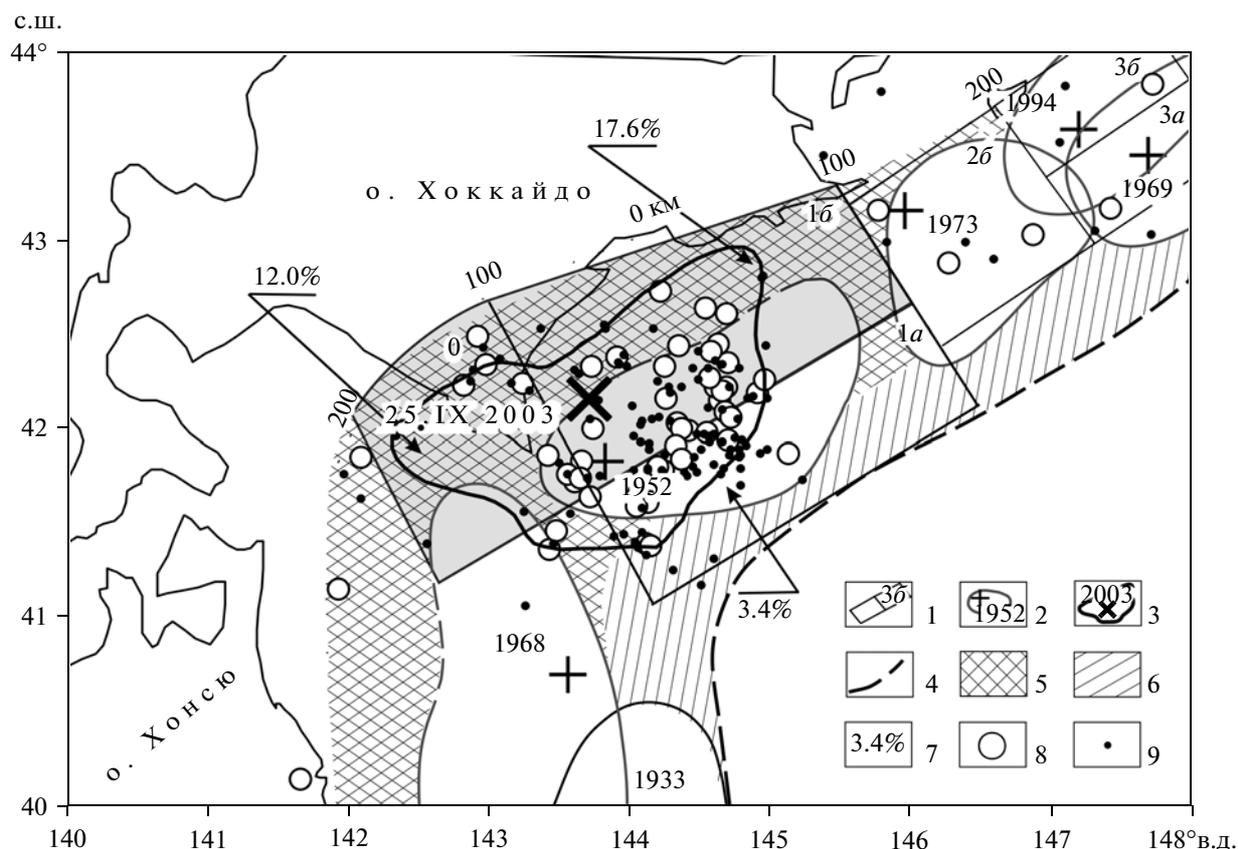


Рис. 7. Ретроспективный прогноз мест и вероятности землетрясений с $M \geq 7.7$ для района о. Хоккайдо на 2001–2005 гг., $H = 0-80$ км [Федотов и др., 2004].

1 – границы и номера участков зоны прогноза; 2 – инструментальные эпицентры главных толчков и границы очагов сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ за период 1897–2003 гг.; 3 – эпицентр и граница области очага землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 4 – оси глубоководных желобов; 5 – наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 6 – возможные места следующих таких землетрясений; 7 – вероятности возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ на период 2001–2005 гг., определены ретроспективно; 8 – эпицентры афтершоков с $M \geq 5.0$ за первые полгода; 9 – эпицентры афтершоков с $M < 5.0$ за первые полгода.

Наиболее опасный участок по прогнозу на 2001–2005 гг. выделен серым цветом.

[Федотов, 1965]. В 1896–1901 гг. восточнее о-ва Хонсю произошло более 7 землетрясений с $M \geq 7.3/4$ [Федотов, 1965], эпицентры которых показаны на рис. 6. При длительности сейсмического цикла 140 ± 60 или 120 ± 50 лет [Федотов, 1965, 2005] район названных землетрясений рассматривался с начала 80-х годов как вероятное место следующих землетрясений с $M \geq 7.7$. Поэтому при построении прогноза в 2005 г. была указана протяженная сейсмическая брешь возле восточного побережья Японии, в которой могла завершиться II стадия сейсмического цикла. Данная брешь была заполнена 11.III 2011 г. в результате катастрофического землетрясения с $M = 8.9$ (рис. 8), что явилось подтверждением этого прогноза вероятного места следующего сильнейшего землетрясения данного региона.

Перед главным толчком землетрясения 11.III 2011 г. в непосредственной близости к его эпицентру, на стыке трех очагов сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений 1933 и 1968 гг. и области очагов группы землетрясений $M = 7.8-8.3$ за период 1897–1901 гг., в течение месяца наблюдалась значительная сейсмическая активизация, включавшая показательный мощный форшок 9.III 2011 г. с $M = 7.3$. Такое развитие сейсмического процесса соответствует средней последовательности, сценарию, форшоков и афтершоков с $M \geq 6$ для тихоокеанских землетрясений с $M \geq 8$, разработанному для краткосрочного уточнения опасности сейсмических брешей [Федотов и др., 1993, 1998₁, 1998₂; Fedotov et al., 1993]. По этому сценарию после предваряющего землетрясения 9.III 2011 г. мог быть дан краткосрочный прогноз возникно-

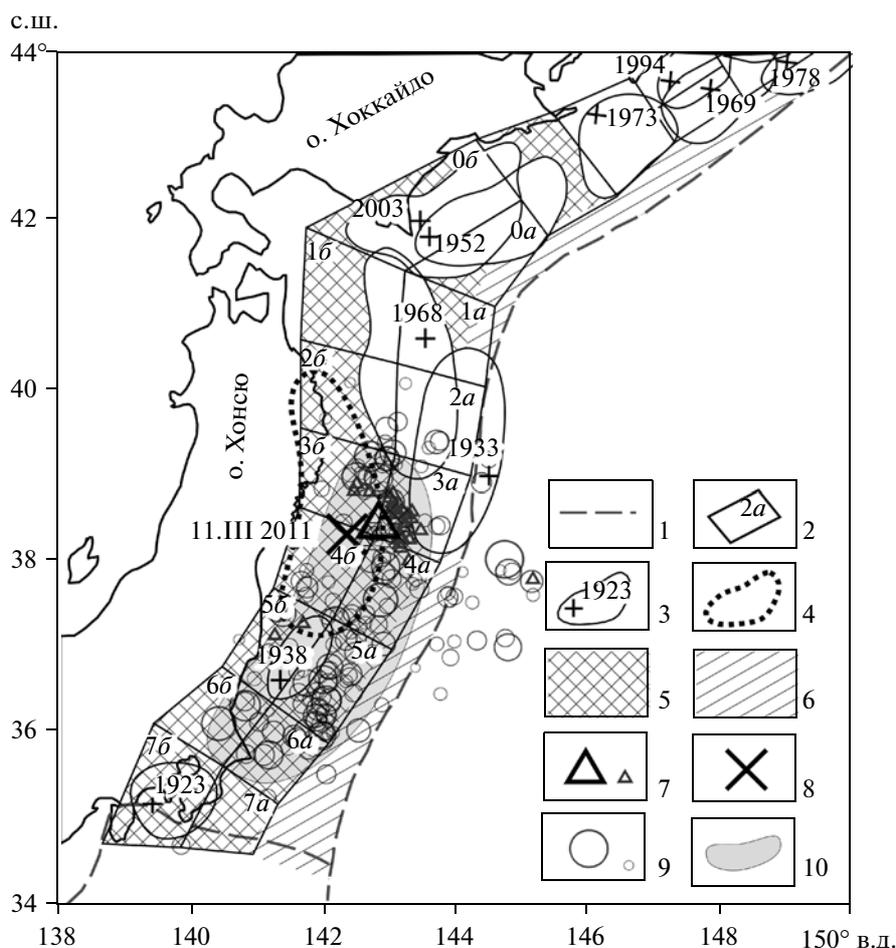


Рис. 8. Заполнение гигантским землетрясением Тохоку, 11.III 2011 г., $M = 8.9$ всей большой предсказанной бреши, показанной в 2005 г. в долгосрочном сейсмическом прогнозе для северо-восточной Японии на 2005–2010 и последующие годы.

1 – оси глубоководных желобов; 2 – участки полосы прогноза и их номера; 3 – инструментальные эпицентры сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений 1923–2003 гг. и границы их очаговых зон; 4 – граница области роя землетрясений с $M = 7.8-8.3$ в период 1897–1901 гг.; 5 – наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ по прогнозу 2005 г.; 6 – возможные места следующих таких землетрясений; 7 – главный форшок 9.III 2011 г., $M = 7.3$, и более мелкие ($M = 4.6-6.3$) форшоки за месяц до сильнейшего землетрясения (маленький треугольник соответствует эпицентрам форшоков с $M = 4.6$); 8 – эпицентр землетрясения 11.III 2011 г., $M = 8.9$; 9 – афтершоки первых трех дней с $M = 4.5-7.1$ (маленький круг соответствует эпицентрам афтершоков с $M = 4.5$); 10 – область очага, построенная по афтершокам первых трех дней.

вения катастрофического землетрясения Тохоку в течение 1–2 дней до него.

Таким образом, на примере трех последних сильнейших землетрясений северо-восточной Японии: 6.V 1968 г., $M = 7.9$, 25.IX 2003 г., $M = 8.1$, и 11.III 2011 г., $M = 8.9$ подтверждена применимость рассматриваемого метода долгосрочного сейсмического прогноза для данного региона. Все эти землетрясения с $M \geq 7.7$ заполняли выделенные сейсмические бреши. Для двух последних из них был возможен краткосрочный прогноз времени главного толчка за 1–2 дня до них по появлению в сейсмических брешах сильных, $M \geq 6$, землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Заключении приводятся краткое обсуждение полученных результатов и главные выводы статьи.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг.

Долгосрочные сейсмические прогнозы по рассматриваемому методу даются 2 раза в год или чаще, если происходят большие изменения в ходе сейсмического процесса в Курило-Камчатском регионе, Введение, раздел 1.

Предыдущий прогноз, данный год назад на IX 2010–VIII 2015 гг., приведен в работе [Федотов и др., 2011]. Необходимость в обновлении прогнозов увеличилась после того как в конце 2010 г. в г. Петропавловск-Камчатский стали вестись большие ускоренные работы по сейсмоусилению. Следующий прогноз был дан на период IV 2011–III 2016 гг. В разделе 1 данной работы приведен прогноз на IX 2011–VIII 2016 гг. Два последних прогноза были составлены после гигантского японского землетрясения Тохоку 11.III 2011 г., $M = 8.9$, которое могло повлиять на уровень сейсмической опасности в различных участках Курило-Камчатской дуги. Этот вопрос обсуждается ниже в другой части Заключения.

Результаты прогноза для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг. приведены в разделе 1 (см. табл. 1–3 и рис. 1). В них даны величины всех прогнозируемых параметров на этот период времени и для всех 20 участков полосы прогноза, а прогнозируемые вероятности возникновения сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ сопоставляются с теми, которые были даны для сейсмических брешей в предыдущем прогнозе на IV 2011–III 2016 гг.

Значительных изменений в распределении величин $P(M \geq 7.7)$ не произошло.

Наиболее опасными местами на Курило-Камчатской дуге остаются район г. Петропавловск-Камчатский, где вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу 7–9 баллов в нем, равна 52.2%.

Вторым наиболее опасным местом остается район Средних Курильских о-вов, где общая вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$ составляет 24.6%, раздел 1.

Дополнение к долгосрочному сейсмическому прогнозу

Перечень восьми прогнозируемых величин и параметров сейсмичности, которые входят в долгосрочный сейсмический прогноз по рассматриваемому методу, основанному на закономерностях сейсмических брешей и сейсмического цикла [Федотов, 2005], приводится во Введении, разделе 1 и в табл. 1 и 3. Во многих случаях к таким регулярным прогнозам добавляются данные, полученные на основании исследования других свойств сейсмических процессов.

В частности, средняя последовательность сильных ($M \geq 6$) форшоков и афтершоков землетрясений с $M \geq 7.7$ применяется для оценки опасности возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ в сейсмических брешах и прогноза сильных афтершоков [Федотов, 2005; Федотов и др., 1993, 1998₁, 1998; Fedotov et al., 1993 и др.].

Даются оценки максимальных возможных магнитуд и возможных интервалов времени сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги (в целом), Курильских о-вов и Камчатки по кумулятивным графикам выделившейся сейсмической энергии [Федотов и др., 2011 и др.].

В данной работе рассматривается одностороннее развитие последовательностей форшоков, главных толчков и афтершоков трех последних сильнейших землетрясений Камчатки: Озерновского землетрясения 15.XI 1969 г.; $M = 7.7$, Усть-Камчатского землетрясения 22.XII 1971 г., $M = 7.8$; и Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$ (раздел 2, табл. 4). Благоприятным обстоятельством для изучения этой последовательности является то, что все они произошли во время 50-летних детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке (1.XI 1961–1.XI 2011 гг.), когда были получены подробные точные данные о связанных с ними землетрясениях.

Сейсмические процессы на Камчатке в этот период развивались таким образом, что происходило перемещение с севера на юг форшоков, главных толчков и афтершоков землетрясений с $M \geq 7.7$, а области очагов этих сильнейших землетрясений также мигрировали с севера на юг.

Вероятно, что такое развитие сейсмичности Камчатки продолжится в следующие годы. В таком случае наиболее вероятным местом следующего сильнейшего землетрясения на Камчатке является сейсмическая брешь в Авачинском заливе в районе г. Петропавловск-Камчатский.

Этот вывод подтверждает независимым образом данные долгосрочного сейсмического прогноза о том, что наиболее вероятным местом следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ на Курило-Камчатской дуге в период IX 2011–VIII 2016 гг. является район г. Петропавловск-Камчатский.

В разделе 2 приведено также внутригодовое распределение сильнейших землетрясений Камчатки. Их возникновение наиболее вероятно в ноябре–декабре.

Важной задачей является исследование природы явлений, рассмотренных в разделе 2.

Долгосрочные сейсмические прогнозы для северо-восточной Японии и влияние землетрясения Тохоку, 11.III 2011 г., $M = 8.9$, на сейсмичность Курило-Камчатской дуги

Гигантское японское землетрясение Тохоку, 11.III 2011 г., $M = 8.9$, привлекло внимание сейсмологов всего мира. В разделе 3 показано, что по рассматриваемому методу были предсказаны места сильнейших японских землетрясений 6.V 1968 г., $M = 7.9$, 25.IX 2003 г., $M = 8.1$ и 11.III 2011 г., $M = 8.9$ (см. рис. 6–8). Такие прогнозы подтверждают возможность и целесообразность применения

рассматриваемого метода долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги в других регионах мира со сходным строением, геодинамикой и сейсмичностью.

Гигантское землетрясение Тохоку могло оказать влияние на ход сейсмических процессов в прилегающих и удаленных регионах.

Полоса прогноза Курило-Камчатской дуги (см. рис. 1) находится на расстоянии 500–2500 км к северо-востоку от эпицентра главного толчка землетрясения Тохоку. В период времени 1.IX 2010–1.IX 2011 гг., до и после землетрясения 11.III 2011 г. в Тохоку, на Курило-Камчатской дуге наблюдалось 8 землетрясений с $M \geq 5.5$. 2 из них, в том числе наиболее сильное с $M = 6.2$, произошли в течение 6 месяцев до землетрясения Тохоку, а 6 таких землетрясений – в течение 6 месяцев после него. В целом увеличение сейсмичности на Курило-Камчатской дуге после землетрясения Тохоку в это время было небольшим, но наблюдались три примечательные особенности.

Наиболее сильное из названных землетрясений с $M = 6.2$ произошло 9.II 2011 г. перед землетрясением Тохоку в середине опасной брешы в Камчатском заливе, участок 15 на рис. 1, табл. 1, 3.

В опасной сейсмической брешы у о-ва Онекотан, Курильские о-ва, участок 8 на рис. 1, табл. 1, 3, в период XI 2010–VIII 2011 гг. происходил рой землетрясений с $M \leq 6$.

Наиболее примечательным событием был рой землетрясений с $M \leq 5.2$, который наблюдался 4–19.III 2011 г., в течение 7 дней (недели) до и недели после землетрясения Тохоку 11.III 2011 г. Он закончился землетрясением 20.III 2011 г. с $M = 5.7$ (см. рис. 1а, 1б). За ним 26.VII 2011 г. последовало землетрясение с $M = 5.6$ в наиболее опасном месте – Авачинском заливе, участок 12б, рис. 1а, 1б, раздел 1.

Таким образом, в течение полугода после землетрясения Тохоку наблюдались отклики в трех местах, наиболее опасных по долгосрочному сейсмическому прогнозу, раздел 1, – в Авачинском заливе, в районе о-ва Онекотан и в Камчатском заливе. Такое совпадение может быть дополнительным подтверждением долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг.

Ряд важных вопросов не затрагивается в данной работе. Среди них – сопоставление рассматриваемого метода прогноза и его результатов с данными других методов прогноза землетрясений. Такое сопоставление проводилось в большинстве предшествующих работ [Федотов, 2005] и дано в предыдущей статье [Федотов и др., 2011].

Во Введении даны сведения о важном применении рассматриваемого метода долгосрочного прогноза, которое ведется в течение более 25 лет, с конца 1985 г.

Данные прогнозов и представленные предложения стали обоснованием 6 Постановлений и Решений Правительства в 1986–2001 гг., 4 Поручений Президентов РФ в 2006–2008 гг. и новых Постановлений Правительства после них о заблаговременной подготовке Камчатской области, края к сильным землетрясениям [Федотов, 2005; Федотов и др., 2011] и др. Во исполнение этих государственных решений с осени 2010 г. ведется интенсивное сейсмоусиление жилых домов и строительство новых сейсмостойких домов в г. Петропавловск-Камчатский. Преображаются целые кварталы города. Это является наглядным свидетельством полной необходимости работ по долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги.

ВЫВОДЫ

Основные выводы представленной работы заключаются в следующем.

1. По долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг. наиболее опасным в ней остается район г. Петропавловск-Камчатский, где вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$, вызывающих сотрясения силой 7–9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский равна приблизительно 52.2%, в том числе землетрясений силой 7–8 баллов – 34.8% и катастрофического силой 9 баллов – 17.4%.

В полной мере сохраняется необходимость продолжения и расширения работ по сейсмозащите, сейсмоусилению и сейсмостойкому строительству.

2. Необходимо дальнейшее продолжение работ по данному методу долгосрочного сейсмического прогноза, которое необходимо для обоснования и планирования мер по подготовке Камчатского края к сильным землетрясениям.

3. В данной работе приведены новые способы, дополняющие применяющийся метод долгосрочного сейсмического прогноза. Необходимы дальнейшие исследования закономерностей сейсмичности, развитие и совершенствование метода, его совместное применение с данными других методов сейсмического прогноза.

Возможно его применение в других регионах мира со сходными строением, геодинамикой и сейсмичностью. Это могло бы быть полезным, например, перед гигантским землетрясением Тохоку 11.III 2011 г.

Многие другие задачи были выделены год назад в предыдущей статье [Федотов и др., 2011].

Метод долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, основанный на найденных закономерностях размещения очагов сильнейших землетрясений (сейсмических брешей) и сейсмического цикла, был создан в 1964–1968 гг. во время детальных сейсмологических на-

блюдений на Камчатке и Курильских о-вах [Федотов, 1987, 2002, 2005 и др.]. С тех пор метод 45 лет применяется и развивается как важное направление этих больших, успешных исследований. 1 ноября 2011 г. исполняется 50 лет со дня начала непрерывных сейсмологических наблюдений и исследований на Камчатке, 1.XI 1961–1.XI 2011 гг. Данная работа посвящается этой знаменательной дате.

Авторы глубоко благодарны сотрудникам, участвовавшим в исследованиях и создававшим необходимые исходные материалы на протяжении полувека.

В последние годы президент РАН академик Ю.С. Осипов, вице-президент РАН академик П.Л. Лавров, председатель ДВО РАН академик В.И. Сергиенко, академик-секретарь ОНЗ РАН академик А.О. Глико, губернаторы Камчатского края А.А. Кузьмицкий и В.И. Илюхин неизменно поддерживали исследования и выдвигали необходимые предложения.

Исследования велись по программе фундаментальных исследований Президиума РАН, проект ДВО РАН № 09-И-П16-06 “Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: продолжение прогноза, обоснование мер по повышению сейсмостойкости, развитие метода и применение в других регионах мира”.

Введение, Раздел 2 и Заключение написаны С.А. Федотовым, Раздел 1 – А.В. Соломатиным, С.А. Федотовым и С.Д. Чернышевым, Раздел 3 – А.В. Соломатиным и С.А. Федотовым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР в 1911–1957 гг. / Отв. ред. Саваренский Е.Ф., Соловьев С.Л., Харин Д.А. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 337 с.

Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Усть-Камчатское землетрясение 15.XII // Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 172–184.

Левин Б.В., Сасорова Е.В., Журавлев С.А. Внутригодичная повторяемость активизации сейсмического процесса для Тихоокеанского региона // ДАН. 2005. Т. 403. № 4. С. 534–540.

Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $M_w = 7.8$, $I_0 = 8$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 250–271.

Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 140–145.

Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения Северной Евразии в 1998 году. Обнинск: ГС РАН, 2004. С. 168–172.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Ред. Кондорская Н.В., Шебакин Н.В. М.: Наука, 1977. 536 с.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 312 с.

Токарев П.И., Федотов С.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М. Землетрясения Камчатки и Командорских островов // Землетрясения в СССР в 1969 году. М.: Наука, 1973. С. 180–194.

Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды Института физики Земли АН СССР. № 36 (203). М.: Наука, 1965. С. 66–93.

Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.

Федотов С.А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.

Федотов С.А. Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Тихоокеанской фокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965–1970 гг. и уточненный прогноз на 1971–1975 гг. // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 101–109.

Федотов С.А. К 25-летию детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах, XI. 1961–X. 1986: история, развитие и задачи // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 3–10.

Федотов С.А. К 40-летию детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 73–79.

Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 303 с.

Федотов С.А., Багдасарова А.М. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 1897–1961 гг. по данным инструментальных наблюдений // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / Отв. ред. Федотов С.А. Новосибирск: Наука, 1974. С. 7–46.

Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Чепкунас К.Е. Озерновское землетрясение и цунами 22(23) ноября 1969 г. // Землетрясения в СССР в 1969 году. М.: Наука, 1973. С. 195–208.

Федотов С.А., Кондратенко А.М. Землетрясения Камчатки и Командорских островов // Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 150–152.

Федотов С.А., Кондратенко А.М., Феофилактос В.Д., Токарев П.И. Землетрясения Камчатки и Командорских островов // Землетрясения в СССР в 1972 году. М.: Наука, 1976. С. 132–145.

Федотов С.А., Кузин И.П., Бобков М.Ф. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961–1962 гг. // Известия АН СССР. Сер. геофизическая. 1964. № 9. С. 1360–1375.

Федотов С.А., Потапова О.В., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Последовательность опасных афтершоков ($M \geq 6$) при сильнейших землетрясениях ($M \geq 7.7$) Курило-Камчатской дуги и сходных структур // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 54–61. (Англ. перевод: *Volcanology and Seismology*. 1998. V. 20. № 1. P. 65–72.)

Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчат-

ской 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.

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. (Англ. перевод: *Volcanology and Seismology*. 2007. V. 1. № 3. P. 143–163.)

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. (Англ. перевод: *Volcanology and Seismology*. 2008. V. 2. № 6. P. 375–394.)

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. (Англ. перевод: *Volcanology and Seismology*. 2011. V. 5. № 2. P. 75–99.)

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.

Федотов С.А., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: достовер-

ность в 1986–2000 гг., развитие метода и прогноз на 2001–2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 3–34.

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 $M \geq 6.0$ // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 3–16.

Федотов С.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Оценка сейсмической опасности землетрясений с $M \geq 6$, сопровождающих сильнейшие ($M \geq 8$) тихоокеанские землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 3–12. (Англ. перевод: *Volcanology and Seismology*. 1994. V. 15. № 6. P. 637–648.)

Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных сейсмологических исследований // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 29–60.

Fedotov S.A., Chernysheva G.V., Shumilina L.S. A probable development “Scenario” for the sequence of strong ($M \geq 6$) foreshocks and aftershocks of earthquakes $M > 8$ in the zone of Pacific ocean // *J. of Earthq. Predict. Res.* 1993. V. 2(4). P. 585–591.

Mogi K. Earthquake Prediction. Tokyo, New York, London: Academic Press, 1985. 355 p. (Русский перевод: Могои К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.)

Sykes L.R. Aftershock zones of greatest earthquakes, seismicity gaps and earthquake prediction for Alaska and Aleutians // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. № 2. P. 8021–8041.

This paper is devoted to the 50-year anniversary of detailed seismological observations and studies in Kamchatka, from November 1, 1961 to November 1, 2011

A Long-Term Earthquake Forecast for the Kuril–Kamchatka Arc for the Period from September 2011 to August 2016. The Likely Location, Time, and Evolution of the Next Great Earthquake with $M \geq 7.7$ in Kamchatka

S. A. Fedotov^{a,b}, A. V. Solomatin^a, and S. D. Chernyshev^a

^a *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

e-mail: Fedotov@kscnet.ru, alf55@mail.ru

^b *Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10 B. Gruzinskaya ul., Moscow, 123810 Russia*

e-mail: karetn@list.ru

Abstract—We consider the results from the ongoing 2010–2011 work on long-term earthquake prediction for the Kuril–Kamchatka arc based on the pattern of seismic gaps and the seismic cycle. We develop a forecast for the next 5 years, from September 2011 to August 2016, for all segments of the Kuril–Kamchatka arc earthquake-generating zone. For 20 segments we predict the appropriate phases of the seismic cycle, the normalized rate of small earthquakes (A_{10}), the magnitudes of moderate earthquakes to be expected with probability 0.8, 0.5, and 0.15, and the maximum possible magnitudes and probability of occurrence for great ($M \geq 7.7$) earthquakes. This study serves as another confirmation that it is entirely necessary to continue the work in seismic retrofitting in the area of Petropavlovsk-Kamchatskii.