

УДК 557.341

ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА IX 2010–VIII 2015 гг., ДОСТОВЕРНОСТЬ ПРЕДЫДУЩИХ ПРОГНОЗОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

© 2011 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@kscnet.ru, alf55@mail.ru

² Институт физики Земли РАН
123995 Москва, Б. Грузинская ул., 10,
e-mail: karetn@list.ru

Поступила в редакцию 18.10.2010 г.

Рассматриваются результаты продолжавшихся в 2008–2010 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 2010–VIII 2015 гг., составленный 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 $M \geq 7.7$. Показана оправданность такого прогноза, дававшегося на предыдущие 5 лет, IX 2005–IX 2010 гг. Сообщается о мерах по сейсмобезопасности и сейсмоусилению, принимаемых на основании таких прогнозов.

ВВЕДЕНИЕ

Долгосрочный сейсмический прогноз – одно из самых важных направлений исследований и работ по прогнозу и оценке сейсмической опасности. Курило-Камчатская дуга является наиболее сейсмичным регионом России. Сейсмичность достигает здесь наивысшего уровня, существующего на Земле. Именно для этого региона и сходных с ним структур в 1965–1968 гг. был предложен метод долгосрочного сейсмического прогноза, основанный на закономерностях размещения вероятных мест следующих сильнейших землетрясений (сейсмических брешей) и сейсмического цикла [Федотов, 1965, 1968]. Понятия “сейсмические брешы”, “сейсмический цикл” и “долгосрочный сейсмический прогноз” были введены в сейсмологию [Sykes, 1971; Mogi, 1985; Соболев, 1993 и др.]. Метод непрерывно применяется, совершенствуясь со временем. 20 основных работ по этому методу и обзор результатов 1962–2002 гг. обобщены в монографии [Федотов, 2005], где представлен метод по состоянию на 2002 г. и дан прогноз на 2001–2005 гг. [Федотов, Чернышев, 2002]. Оценка предыдущих прогнозов и прогноз на 2004–2008 гг. даны в [Федотов и др., 2004]. Последние описания метода приведены в [Федотов и др., 2007, 2008₂].

В круг задач и вопросов долгосрочного сейсмического прогноза входят изучение закономерностей сейсмической деятельности, составление и совер-

шенствование долгосрочных сейсмических прогнозов, получение данных об опасности сильных землетрясений, необходимых для подготовки к ним и для принятия мер по предотвращению ущерба и потерь.

В настоящее время по этому методу прогнозируется ряд характеристик сейсмичности Курило-Камчатской дуги на следующие пять лет. Выделяются места следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ (сейсмические брешы); к ним относятся участки, где таких землетрясений не было в течение последних 80 лет. Наиболее активная полоса сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги с глубинами очагов 0–80 км, длиной 2100 км и шириной 100 км условно делится чаще всего на 20 участков. Для них прогнозируются стадии сейсмического цикла, указываются места сейсмических брешей, определяется относительная опасность сейсмических брешей, прогнозируются сейсмическая активность A_{10} (нормированное число слабых землетрясений энергетического класса [Федотов, 1972] $K_S = 10$ или $M = 3.5$ в год на площади 10^3 км²), магнитуды M землетрясений средней силы, ожидаемых с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные магнитуды землетрясений и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$. Выделяются те сейсмические брешы, в которых наиболее велика вероятность возникновения новых землетрясений с $M \geq 7.7$ в следующие 5–10 лет. [Федотов и др., 2004, 2007, 2008₂; Fedotov et al., 2007, 2008, 2009 и др.]. Долгосрочные сейсмиче-

ские прогнозы сильнейших землетрясений 1965–2005 гг. оправдывались с вероятностью 0.8–0.9 [Федотов, Чернышев, 1987; Федотов и др., 2008₂; Fedotov, Chernyshev, 1990; Fedotov et al., 2008 и др.].

Долгосрочные сейсмические прогнозы составляются на 5 следующих лет, так как величины параметров, на основании которых составляются прогнозы, определяются за предшествующие 5 лет, а землетрясения с $M \geq 7.7$ повторяются во всей Курило-Камчатской дуге в среднем один раз в пять лет [Федотов, 1965, 1968, 2005; Федотов и др., 2004, 2007, 2008₂ и др.], раздел 1 этой работы.

Прогнозы обновляются через полгода или чаще, если происходят сильные землетрясения и существенно меняются параметры сейсмичности за предыдущие пять лет. Полученные прогнозы сопоставляются с долгосрочными сейсмическими прогнозами, полученными другими методами (M8 и др.), [Кейлис-Борок, Кособоков, 1986; Кособоков, 2005; Матвиенко, 1998; Соболев, 1993, 1999; Федотов, Чернышев, 1987; Широков, Серафимова, 2006 и др.].

Метод может применяться в других регионах мира, имеющих сходные структуру, геодинамику и сейсмотектонику. Один из последних примеров применения рассматриваемого метода в других регионах мира дан в [Федотов и др., 2004], где построен ретроспективный долгосрочный сейсмический прогноз для Хоккайдского землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$.

Построенные долгосрочные сейсмические прогнозы одновременно являются долгосрочными сейсмическими прогнозами цунами в различных районах Курило-Камчатской дуги.

Имеет высокую важность применение результатов рассматриваемых работ. Данные долгосрочных сейсмических прогнозов 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 от 17.05.2006, 02.11.2006 и 22.09.2007 гг., а 16.10.2008 г. 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 [Федотов и др., 2008₁]. Правительство РФ 30.07.2009 г. выделило такие средства Камчатскому краю и Сахалинской области на повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в 2009–2013 гг.

Данная работа является продолжением и развитием предыдущих исследований по долгосрочному сейсмическому прогнозу [Федотов, 2005; Федотов и др., 2004, 2007, 2008₂ и др.].

В разделе 1 кратко сообщается о методе и способах построения прогнозов в последние годы. Приводится долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги, данный ранее на предшествующие 5 лет, IX 2005–IX 2010 гг., показывается его достоверность и дается сопоставление этого прогноза с крупными сейсмическими событиями этих лет, Средне-Курильскими (Симуширскими) землетрясениями 15.XI 2006 г., $M_S = 8.2$ и 13.I 2007 г., $M_S = 8.1$ и сейсмичностью всех участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги.

В разделе 2 приводится долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на следующие 5 лет, IX 2010–VIII 2015 гг., построенный по применяемому методу.

В разделе 3 рассматриваются дополнения к этому прогнозу, обсуждаются возможности использования метода в сочетании с другими методами долгосрочного и среднесрочного сейсмического прогноза, а также необходимость дальнейшего развития метода и его применения. В “Заключении” приводятся основные научные и прикладные результаты работы.

1. ВЫПОЛНЕНИЕ ДОЛГОСРОЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА IX 2005–IX 2010 гг. АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В КУРИЛО- КАМЧАТСКОЙ СЕЙСМОГЕННОЙ ЗОНЕ В ЭТОТ ПЕРИОД

Главной задачей данной работы является рассмотрение и оценка долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на следующие пять лет, IX 2010–VIII 2015 гг., раздел 2. В разделе 1 перед этим показывается выполнение такого прогноза за предшествующие 5 лет IX 2005–IX 2010 гг.

Основы метода, используемые закономерности и параметры, способы составления прогнозов изложены в [Федотов, 1965, 1968, 2005] и других работах. Последние обоснования метода и способы расчета прогнозируемых величин приведены в [Федотов и др., 2007, 2008₂]. Ниже даны лишь краткие сведения, необходимые для объяснения приведенных долгосрочных сейсмических прогнозов и их оценки.

Сейсмологические наблюдения, ведущиеся более ста лет, показали, что по своей сейсмичности Курило-Камчатская дуга длиной около 2100 км является, в первом приближении, однородной на всем своем протяжении структурой. В рассматриваемом методе долгосрочного прогноза ее наиболее сейсмически активная полоса с глубинами очагов 0–80 км и шириной 100 км, делится, как правило, на 20 участков длиной от 100 до 200 км.

При исследовании закономерностей сейсмичности Курило-Камчатской сейсмогенной зоны были выявлены “сейсмические бреши” и сейсмиче-

ский цикл сильнейших землетрясений. Длительность цикла равна 140 ± 60 лет или 120 ± 50 лет.

Для выделенных участков на следующие 5 лет прогнозируются стадии сейсмического цикла (I – стадия афтершоковых процессов, II – стадия стабильного накопления упругой энергии, III – завершающая стадия, характеризующаяся значительным количеством накопленной энергии, активизацией, высокой нестабильностью сейсмического процесса, форшоками), определяются наиболее вероятные места следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ – сейсмические бреши, к которым относятся участки, где таких землетрясений не было в течение последних 80 лет.

Как отмечено во “Введении”, для всех участков указывается их относительная опасность, прогнозируются сейсмическая активность A_{10} – нормированное число слабых землетрясений энергетического класса $K_S = 10$, $M = 3.2$ в год на площади 10^3 км^2 (шкала K_S дана в работе [Федотов, 1972]), магнитуды M землетрясений средней силы, ожидаемых с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимально возможные магнитуды сильнейших землетрясений и вероятности их возникновения.

Исходной основой для составления долгосрочных сейсмических прогнозов являются данные о параметрах сейсмического процесса в полосе прогноза за предшествующие 5 лет.

При построении прогнозов для участков, проходящих III стадию цикла, определяются вероятности отклонения основных параметров сейсмического процесса в отдельных участках от средней величины параметров, характерной для II стадии цикла. В качестве основных параметров выбраны: сейсмическая активность A_{10} и относительная величина сброшенной сейсмической энергии $D(t) = E_2(t)/E_1(t)$, где $E_2(t)$, Дж/год $\cdot 10^3 \text{ км}^2$ – нормированная величина сейсмической энергии, выделяющейся в рассматриваемом участке за время t , а $E_1(t)$, Дж/год $\cdot 10^3 \text{ км}^2$ – средняя нормированная величина сейсмической энергии, выделяющейся в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне [Федотов, 1968, 2005; Федотов, Чернышев, 1987, 2002; Федотов и др., 2007, 2008; Fedotov et al., 2007, 2008]. Для уточнения прогноза используется также параметр A_{11} , построенный аналогично A_{10} для землетрясений класса $K_S = 11$, $M = 4.3$ и выше для более продолжительных интервалов 10–15 лет. Соответствующие вероятности $P(A_{10})$, $P(D)$ и $P(A_{11})$ используются для оценки параметра B : $B = P(A_{10}) \cdot P(D)$, $B_1 = P(A_{10}) \cdot P(D) \cdot P(A_{11})$ или $B_2 = (P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11}))/3$. В среднем, чем меньше параметр B , тем больше вероятность того, что рассматриваемая область возможного землетрясения с $M \geq 7.7$ вступила в стадию форшоков [Федотов, Чернышев, 2002].

Вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ в участках дуги, проходящих I или II стадии сейсмического цикла, оценивается 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 [Федотов, 2005; Федотов и др., 2004, 2007, 2008; Fedotov et al., 2007, 2008].

Метод успешно применяется и развивается с 1965 г. [Федотов, 1965, 1968, 2005 и др.]. Долгосрочные сейсмические прогнозы составляются на следующие 5, реже 10, 15 и 20 лет и даются обычно два раза в год с обновлением исходных данных. 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 дополнительные прогнозы. Часть прогнозов публикуется. Среди них были прогноз на 2001–2005 гг. [Федотов, Чернышев, 2002], на 2004–2009 гг. [Федотов и др., 2004], на IV 2008–III 2013 гг. [Федотов и др., 2008; Fedotov et al., 2008 и др.].

Среди неопубликованных прогнозов был прогноз для Курило-Камчатской дуги на предшествующие 5 лет IX 2005–IX 2010 гг., составленный 6 октября 2005 г.

По данному прогнозу наибольшая опасность землетрясений с $M \geq 7.7$ на IX 2005–IX 2010 гг. была определена для района г. Петропавловска-Камчатского – в участках 12б, 11б, и 13а (табл. 1, рис. 1). Вероятности возникновения в них землетрясений с $M \geq 7.7$, способных вызвать в г. Петропавловск-Камчатский колебания силой 9, 8 или 7 баллов, равнялись соответственно 14.9%, 17.1% и 10.6%, в сумме 42.6%. Дополнительная опасность землетрясения силой 8 или 7 баллов из менее опасных участков 11а, 12а и 13б равнялась 5.9%. Эти цифры показывают, что высокий уровень опасности сильнейших землетрясений был отмечен, прежде всего, в г. Петропавловск-Камчатский.

На втором месте оставался район Средних Курильских островов, мыс Кастрикум – о-в Онекотан (см. рис. 1, участки 6–9). Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в них равнялась 25.9%.

Именно в этом районе 15.XI 2006 г. произошли Средне-Курильское (Симуширское) землетрясение с $M = 8.2$, область очага которого оказалась в участке 7 (см. табл. 1, рис. 1 и рис. 2) в пределах обширной сейсмической бреши (участки 6–9), и связанное с ним землетрясение 13.I 2007 г. с $M = 8.1$. Его эпицентр находился за глубоководным желобом (см. рис. 1 и 2), в пределах очага Средне-Курильского землетрясения, определенного по афтершокам первых двух месяцев.

Таким образом, очередной раз подтвердился долгосрочный сейсмический прогноз для сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги. Бы-

ли правильно определены вероятное место области очага этого землетрясения и выделены два наиболее опасных из вероятных мест следующих сильнейших землетрясений, имевшихся в Курило-Камчатской дуге. Средне-Курильское землетрясение произошло в одном из них.

Более подробно о прогнозе этого землетрясения и исследовании сейсмического процесса, сопровождавшего его, сказано в работах [Федотов и др., 2006, 2007; Fedotov et al., 2007, 2008], а также в работе [Тараканов, 2008] и др.

В правой части обобщающей табл. 1 приведены данные оправдываемости прогноза основных параметров сейсмического процесса: A_{10} , $M(P = 0.8)$ и M_{\max} . Можно отметить, что прогноз A_{10} оказался верен в 13 из 19 предсказанных интервалов или в 68%. Среди неудачно спрогнозированных величин A_{10} занижена половина. Это указывает на то, что верно выбран средний уровень A_{10} , для участков, проходящих I и II стадии сейсмического цикла. В то же время для сейсмических брешей число верно предсказанных интервалов 7 из 8, или 88%, что подтверждает повышение сейсмической активности на III стадии сейсмического цикла.

Несколько худший результат оказался при проверке величины $M(P = 0.8)$: 10 верно предсказанных магнитуд из 19 (53%).

В качестве большого успеха можно отметить точно предсказанный уровень M_{\max} для Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г. Оно не только заполнило участок 7 в пределах обширной сейсмической бреши в районе Средних Курильских островов, но и имело точно предсказанную магнитуду $M = 8.2$ (см. табл. 1, рис. 1 и 2).

Рассмотрим реализацию сейсмического прогноза подробнее. На рис. 2 представлен долгосрочный сейсмический прогноз на IX 2005–IX 2010 гг. вместе с реальными изолиниями A_{10} и эпицентрами землетрясений с $M \geq 5.0$ с глубинами $H < 80$ км по данным за этот период.

Участок 1. Мыс Сириха – п-ов Немуро. Высокие оценки вероятности сильнейшего землетрясения $P_1(M \geq 7.7)$ и $P_2(M \geq 7.7)$ на период IX 2005–IX 2010 гг. для этого участка (см. табл. 1) объяснялись в значительной мере развитием в нем афтершокового процесса после землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$, воз-

ле юго-восточного побережья о. Хоккайдо. Это показывает резкое повышение вероятности $P_1(M \geq 7.7)$ с 3.9 до 10.3% по сравнению с предыдущим прогнозом по данным 1995–2000 гг. (см. табл. 1, цифры в скобках). В интервале IX 2003–VIII 2005 гг. на этот участок пришлось 2 самых сильных землетрясения из 5 по всей Курило-Камчатской дуге, в том числе землетрясение с $M = 7.0$ (см. рис. 1). В дальнейшем уровень сейсмичности как в области слабых, так и области сильных землетрясений в участке 1 заметно снизился и в период времени IX 2005–VIII 2010 гг. стал несколько ниже среднего уровня (см. табл. 1, реализация прогнозов).

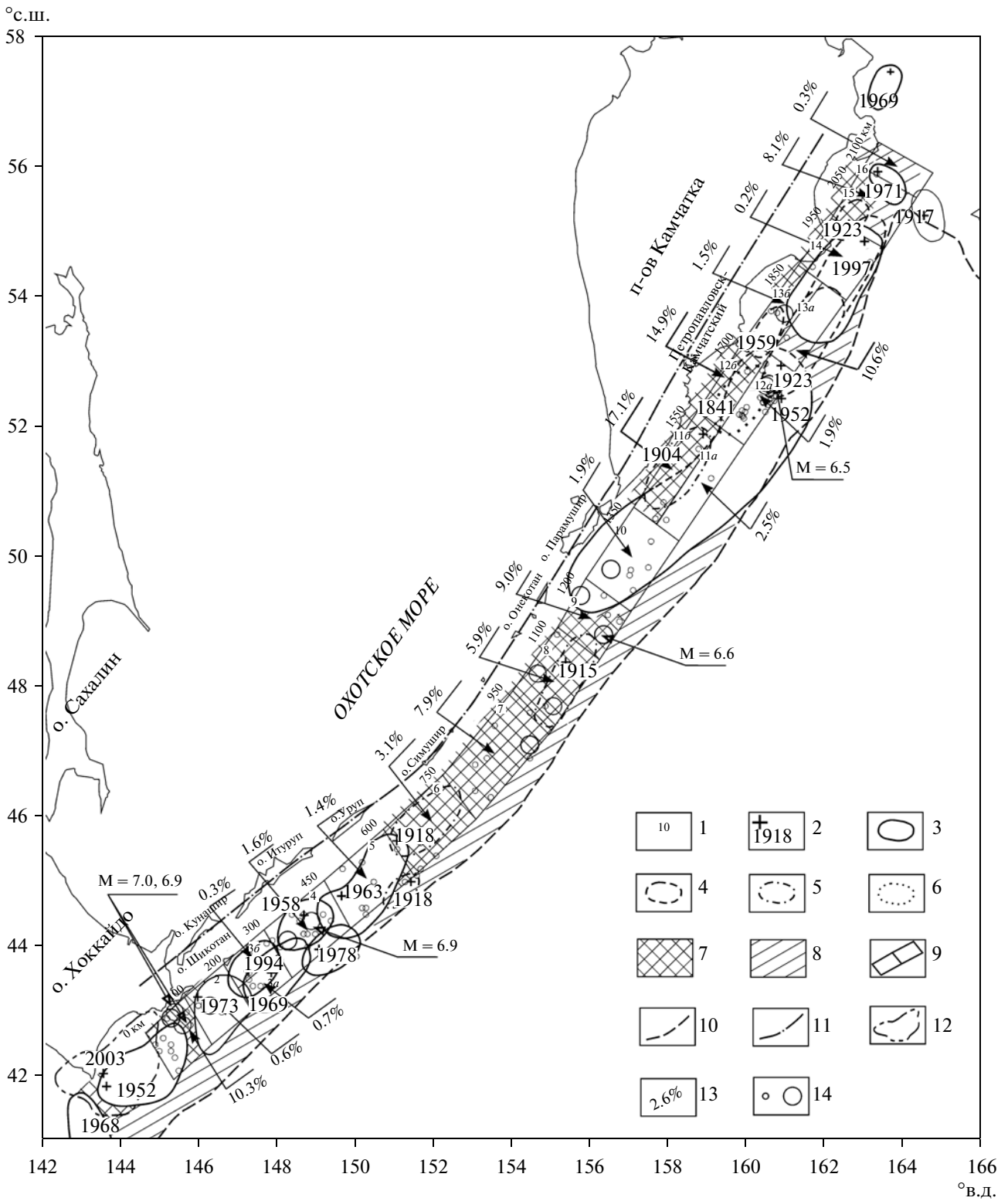
Участки 2–5. Южные Курильские о-ва. За период IX 2005–VIII 2010 гг. уровень сейсмичности в этих участках был в основном, в пределах нормы для I и II стадий сейсмического цикла (см. табл. 1, рис. 2). Вероятнее всего эти участки проходят II стадию цикла, и поэтому опасность сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения в них по данному прогнозу оставалась относительно низкой: от 0.3% до 1.6%. Небольшой рой землетрясений с наибольшим событием с $M = 5.8$ произошел 6.VII 2008 г. в пределах участка 5.

Участки 6–9. Средние Курильские о-ва в прогнозе на IX 2005–IX 2010 гг. входили в протяженную, общей длиной около 600 км, сейсмическую брешь (см. рис. 1). Именно в ней, на участке 7 (см. рис. 2) 15.XI 2006 г. произошло сильнейшее Средне-Курильское (Симуширское) землетрясение с $M = 8.2$. Суммарная вероятность сильнейшего землетрясения в участках 6–9 на период IX 2005–IX 2010 гг. оценивалась величиной 25.9%, что только немного ниже оценки в 32.0%, для второй протяженной бреши (участки 11б и 12б, Южная Камчатка, Авачинский залив).

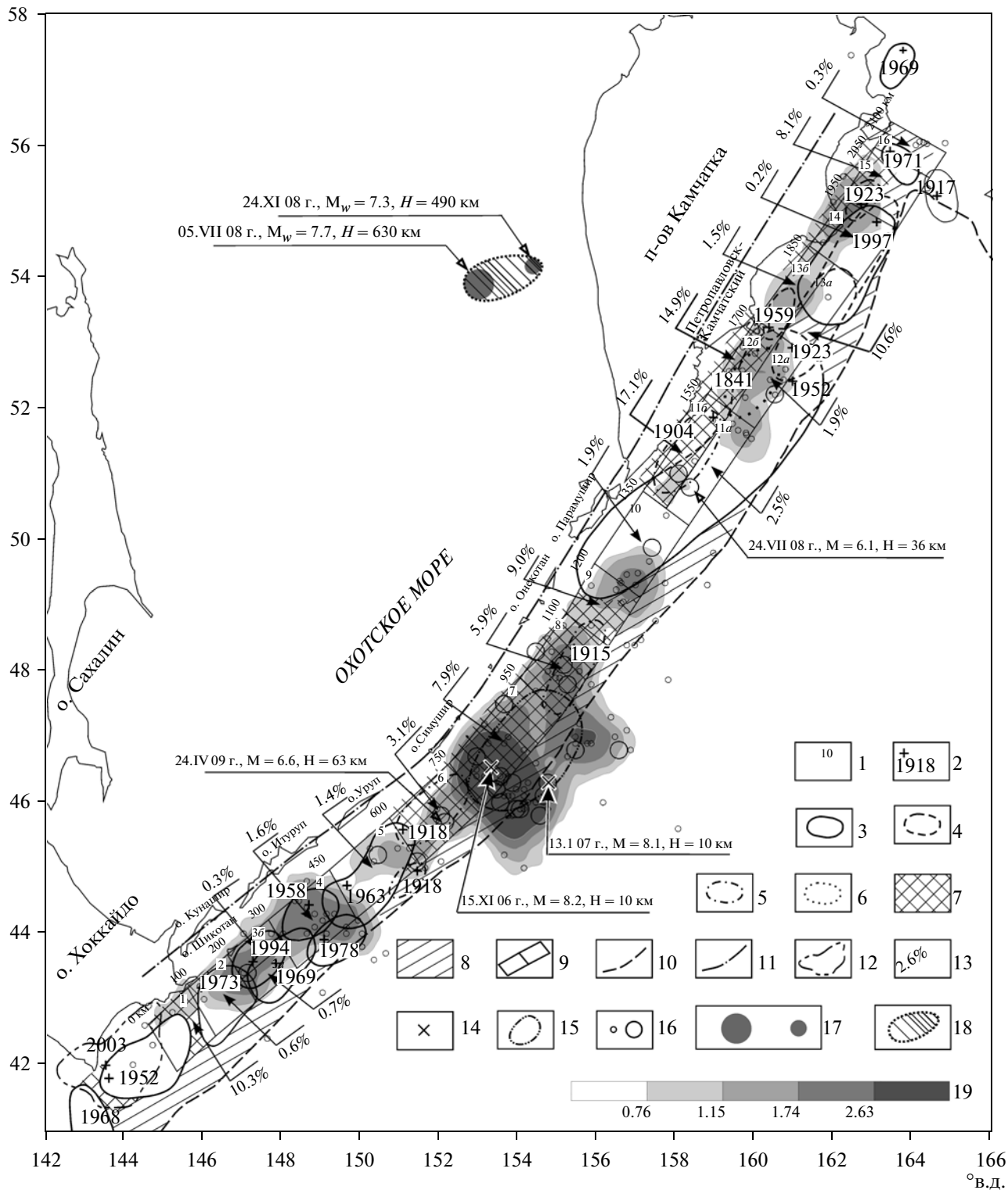
Анализ сейсмического процесса в данной области непосредственно перед Средне-Курильским землетрясением приведен в работе [Федотов и др., 2007; Fedotov et al., 2007].

Афтершоковая активизация после Средне-Курильского землетрясения захватила также соседние участки 6 и 8 (см. рис. 2). Высокая роевая активность в участке 6, которая наблюдалась 7–24.IV 2009 г. с главным событием $M = 6.6$, вероятно, связана с процессами на концах главного разрыва очага Средне-Курильского землетрясения. За прошедшее пятиле-

Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IX 2005–IX 2010 гг., очагов курило-камчатских землетрясений 1904–2005 гг. с $M \geq 7.7$, $H = 0–80$ км, и вероятностей возникновения таких землетрясений в IX 2005–IX 2010 гг. во всех участках полосы прогноза: 1 – номер участка; 2 – инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 – границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 – участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 – вероятные области очагов землетрясений 1904–1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6 – предполагаемая область очага 1841 г.; 7 – наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 8 – возможные места следующих таких землетрясений; 9 – границы участков прогноза; 10 – оси глубоководных желобов; 11 – ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 12 – предварительное определение границы очага землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 13 – вероятности землетрясений $M \geq 7.7$ в IX 2005–IX 2010 гг., см. табл. 1, (средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет 3.6–4.2%); 14 – эпицентры землетрясений $H < 80$ км, произошедших в предшествующий период VI 2000–V 2005 гг., меньший кружок, соответствует $5.0 \leq M \leq 6.0$, больший – $6.0 \leq M \leq 7.0$ (каталог КФ и СФ ГС РАН).



°с.ш.



тие высокая активность наблюдалась также на другом конце разрыва в пределах участка 8, где одно из последних сильных ($M = 5.9$) сейсмических событий было зарегистрировано 10.IX 2009 г.

С конца 2006 г. наблюдалась также повышенная сейсмическая активность на границе сейсмических участков 9 и 10, Северные Курильские о-ва (см. рис. 2).

Высокий уровень сейсмичности, наблюдавшийся в крупной Средне-Курильской брешии после Средне-Курильских (Симуширских) землетрясений 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, и 13.I 2007 г., $M = 8.1$, был вызван мощным роем афтершоков и их распространением из общего очага этих землетрясений в участке 7 вдоль сейсмической брешии в прилегающие участки Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, участки 6 и 8 (см. рис. 1 и 2, табл. 1).

Участок 10. Северные Курильские о-ва. Этот участок входит в область гигантского очага сильнейшего Камчатского землетрясения 4.XI 1952, $M = 8.5$ и поэтому не относится к сейсмическим брешам и не считается сейсмически опасным. Уровень сейсмичности для этого участка оставался в пределах нормы для II стадии сейсмического цикла (см. табл. 1, рис. 2).

Участки 11 и 12. Побережье Южной Камчатки и Авачинский залив. К протяженной сейсмической брешии, простирающейся вдоль Южной Камчатки и Авачинского залива, относятся прибрежные части этих участков (11б и 12б).

Внешние их части (участки 11а и 12а) находятся в области гигантского Камчатского землетрясения 4.XI 1952 г., $M = 8.5$. В IX 2005–VIII 2010 гг., а также в настоящее время они проходят сравнительно малоопасную II стадию сейсмического цикла (см. табл. 1, рис. 1 и 2).

Высокий уровень сейсмической активности, наблюдавшийся в последнее пятилетие в пределах общей сейсмической брешии возле побережья Южной Камчатки и Авачинского залива (участки 11б и 12б), подтверждает сделанный ранее прогноз на IX 2005–

IX 2010 гг. о высокой сейсмической опасности этой области (см. табл. 1, рис. 1 и 2).

Для участка 11б прогнозировались вероятности $P_1(M \geq 7.7) = 11.5\%$ и $P_2(M \geq 7.7) = 17.1\%$ (см. табл. 1). Вторая цифра в большей мере соответствует прогнозу для этого же участка по данным 1995–2000 гг. (18.3%). Таким образом, в данном случае параметр A_{11} , осредняющий данные предшествовавших 15 лет, скомпенсировал при прогнозировании некоторое уменьшение сейсмической активности, наблюдавшееся в 2001–2005 гг. Для участка 12б обе вероятности, $P_1(M \geq 7.7)$ и $P_2(M \geq 7.7)$, практически совпали: 14.5 и 14.9% соответственно.

Примечательным за прошедшее пятилетие событием в районе участка 11б было неглубокое землетрясение 24.VII 2008 г., $M = 6.1$ возле его границы (см. рис. 2). Оно могло быть отдаленным откликом на сильнейшее глубокое ($H = 630$ км) землетрясение под дном Охотского моря, которое произошло 5.VII 2008 г. напротив участка сейсмогенной зоны у побережья Южной Камчатки и Авачинского залива и имело магнитуду $M_W = 7.7$ (см. рис. 2).

Участки 13–16. Кроноцкий и Камчатский заливы. Наибольшая сейсмическая активность за прошедшее пятилетие в пределах этой области наблюдалась в участке 13б и на границе участков 14 и 15. Уровень сейсмичности в пределах сейсмических брешей (участки 13а и 15) был ниже среднего (см. табл. 1, рис. 2). Необходимо заметить, что оценка вероятности $P_2(M \geq 7.7) = 10.6\%$, полученная для участка 13а на основе трех параметров, включая A_{11} , была, вероятно, несколько завышена. Это могло быть вызвано влиянием афтершоков землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8$ в предшествующие годы, так как параметр A_{11} рассчитывается по 15-летнему периоду (см. табл. 1).

Краткий вывод из анализа соответствия фактической сейсмичности, наблюдавшейся в IX 2005–VIII 2010 гг., данному на этот период прогнозу.

Наибольшим успехом используемого метода долгосрочного сейсмического прогноза стал верный

Рис. 2. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IX 2005–IX 2010 гг., очагов курило-камчатских землетрясений 1904–2010 гг. с $M \geq 7.7$, $H = 0–80$ км, и вероятностей возникновения таких землетрясений в IX 2005–IX 2010 гг. во всех участках полосы прогноза, а также фактических изолиний A_{10} и эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ за эти годы: 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 2005–IX 2010 гг., см. табл. 1 (средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6–4.2%); 14 – эпицентры Средне-Курильских землетрясений 15.XI.2006 г., $M_W = 8.3$, и 13.I 2007 г., $M_W = 8.1$; 15 – область очага предсказанного землетрясения 15.XI 2006 г.; 16 – эпицентры землетрясений, произошедших в прогнозируемый период IX 2005–VIII 2010 гг., $H < 80$ км, меньший кружок, соответствует $5.0 \leq M < 6.0$, больший – $6.0 \leq M \leq 7.3$ (каталог КФ и СФ ГС РАН); 17 – эпицентры землетрясения 5.VII 2008 г., $M_W = 7.7$, $H = 630$ км., и его главного афтершока с $M_W = 7.3$ с глубиной на 140 км меньшей; 18 – вероятная область очага землетрясения 5.VII 2008 г., $M_W = 7.7$ (каталоги NEIC и IRIS); 19 – шкала изолиний сейсмической активности A_{10} , нанесенных на карте, средний уровень для II стадии сейсмического цикла – 1.15, логарифм дисперсии – 0.18 (одна ступень по шкале).

Таблица 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2005–IX 2010 гг. ($N \leq 80$ км), полученный с использованием параметров A_{10} , D , A_{11} , его реализация в это время

Участок	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2000–2005 гг. (29. VIII 2000–28. VIII 2005 гг.)					Прогноз на IX 2005–IX 2010 гг.						Реализация в IX 2005–VIII 2010 гг.					
			Стадия	$P_1 = P(A_{10})$	$P_2 = P(D)$	$P_3 = P(A_{11})$	$V = (P_1 * P_2 * P_3)$	A_{10}	$A_{10} \pm \sigma$	M			M_{MAX}	$P_1(M \geq 7.7)\%$	$P_2(M \geq 7.7)\%$	Вероятная очередность на основе $P_2(M \geq 7.7)$	A_{10}	M ($P \sim 0.8$)	M_{MAX}
										$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$							
1	0–100	Мыс Сириха–п-ов Немуро	III	0.19	0.01	0.94	0.002	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	11.4(3.9)	10.3	4(7)	0.8	4.6	4.6
2	100–200	П-ов Немуро–о-в Зеленый	II					1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.6(0.5)	0.6		1.0	5.6	5.6
3a	200–300	О-в Шикоган, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		0.7(0.6)	0.7		2.1	4.7	4.7
3b	200–300	О-в Шикоган, С-З	I					2.1 → 1.4	0.9–3.1	6.0	6.4	6.9		0.3(0.2)	0.3		3.3	5.8	5.8
4	300–450	О-в Итуруп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.6(1.4)	1.6		2.0	6.0	6.0
5	450–600	Против Фриза–о-в Уруп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.4(1.1)	1.4		0.6	5.8	5.8
6	600–750	Мыс Кастрикум–пр. Буссоль	III?	0.98	0.99	0.73	0.71	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	3.4(7.7)	3.1	9(6)	1.7	6.6	6.6
7	750–950	О-в Симулир–пр. Крузенггерна	III?	0.97	0.66	0.86	0.55	1.2–3	0.8–4.5	6.2	6.7	7.2	8.2	10.9(11.7?)	7.9	7(4?)		6.1	8.2
8	950–1100	О-в Шиашкотан	III?	0.99	0.58	0.95	0.55	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0(3.5)	5.9	8(8)	1.6	6.1	6.1
9	1100–1200	О-в Онекотан–пр. 3-й Курильский	III	0.80	0.16	0.90	0.12	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	10.2(5.8)	9.0	5(5)	1.0	5.6	5.6
10	1200–1350	О-в Парамушир–мыс Лопатка	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.9(2.7)	1.9		1.5	6.0	6.0
11a	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		2.5(3.6)	2.5		0.4	6.1	6.1
11b	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.68	0.89	0.25	0.15	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	11.5(18.3)	17.1	1(2)	0.9	6.1	6.1
12a	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		1.9(2.7)	1.9		1.0	5.6	5.6
12b	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, С-З	III	0.23	0.82	0.19	0.04	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	14.5(20.5)	14.9	2(1)	1.3	5.8	5.8
13a	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.92	0.82	0.37	0.28	1.2–3	0.6–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	6.7(3.6)	10.6	3	0.4	4.8	4.8
13b	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-З	II					0.8	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.5(1.3)	1.5		1.4	5.0	5.0
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	I					3.1 → 1.9	1.2–4.5	6.0	6.5	7.0		0.2(0.2)	0.2		1.6	5.3	5.3
15	1950–2050	Зал. Камчатский	III?	0.33	0.70	0.83	0.19	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	9.3(8.5)	8.1	6(3)	0.9	5.1	5.1
16	2050–2100	П-ов Камчатский	II					0.8	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		0.3(0.3)	0.3		1.4	5.4	5.4
		Оценка критических значений вероятностей		0.062	0.308	0.354	0.007							$\Sigma = 100.0$					

Примечание. В табл. даны прогнозы характеристик сейсмичности на IX 2005–IX 2010 гг. и данные по их реализации. Для всех 20 участков указываются вероятные стадии сейсмического цикла. Индексом III отмечены те участки, в которых землетрясения с $M \geq 7.7$ не происходили в течение последних 80 лет и где значительно вероятнее прихода заключительной, III стадии сейсмического цикла. Знаками вопроса отмечены те участки, в которых вероятность такого события меньше. 1 – V – параметр, показывающий относительную опасность “сейсмической 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 землетрясений; $P_1(M \geq 7.7)$ и $P_2(M \geq 7.7)$ – прогнозируемые вероятности сильных землетрясений по двум параметрам (A_{10}, D) и трем параметрам (A_{10}, D, A_{11}) соответственно. Значения вероятности $P_1(M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их величинам по прогнозу на 2001–2005 гг. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6-4.2\%$. В графе “Реализация в 2005–2010 гг.” приведены фактические значения A_{10} , магнитуды M наибольших зарегистрированных землетрясений средней силы (для 7-го участка – на III стадии цикла), и магнитуда M предсказанного Средне-Курильского (Симулирского) землетрясения 15.XI 2006 г. Жирным шрифтом выделены оправдавшиеся прогнозы. Фигурными скобками обозначены участки, образующие обширные сейсмические бреши в районе Средних Курильских островов и Камчатки.

прогноз сильнейшего Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$. Для него были правильно определены магнитуда и вероятное место области очага, которое выделялось как одно из двух наиболее опасных из вероятных мест следующих сильнейших землетрясений, имевшихся в Курило-Камчатской дуге.

Анализ сейсмического процесса за период IX 2005–VIII 2010 гг. в целом подтвердил правильность прогноза его характеристик. Это является подтверждением справедливости исходных положений для данного метода прогноза, в том числе положения об однородности сейсмического процесса на протяжении всей сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги.

Составной частью метода долгосрочного сейсмического прогноза является методика, позволяющая оценивать опасность сильных ($M \geq 6.0$) афтершоков землетрясений с $M \geq 7.7$. Такие прогнозы имеют важное значение при планировании спасательных и восстановительных работ после разрушений, вызванных основным землетрясением. Для оценки опасностей, возникающих в течение первого года афтершокового процесса после тихоокеанских землетрясений с $M \geq 7.7$ в 1993 г. был построен “сценарий афтершоков” [Федотов и др., 1993]. Описание этой методики и результаты ее проверки даны в работах [Федотов и др., 1993, 1994, 1998, 2007, 2008₂; Fedotov et al., 1998]. Оперативные прогнозы опасности сильных афтершоков Олюторского землетрясения (Корякское нагорье) 20(21).IV 2006 г., $M = 7.8$, Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$ передавались Совету Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов.

Развитие сейсмического процесса после Средне-Курильского землетрясения напоминает пару землетрясений 7.IX 1918 г., $M = 8.2$ и 8.XI 1918 г., $M = 7.9$, произошедших с тем же интервалом в два месяца у овов Симушир и Уруп. Анализ афтершокового процесса Средне-Курильского землетрясения [Федотов и др., 2008₂] позволил сделать вывод об общем очаге землетрясений 15.XI 2006 г., $M = 8.2$ и 13.I 2007 г., $M = 8.1$. В этом случае последнее можно считать сильнейшим афтершоком, вероятность которого в интервале магнитуд $M \geq 7.9$ по “сценарию афтершоков” была ~ 0.67 . В целом развитие афтершокового процесса Средне-Курильского землетрясения соответствовало “сценарию афтершоков” [Федотов и др., 2008₂].

2. ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА IX 2010–VIII 2015 гг. (ПО ОЦЕНКАМ НА СЕНТЯБРЬ 2010 г.)

Данный метод долгосрочного сейсмического прогноза основан на закономерностях размещения очагов сильнейших землетрясений (сейсмические бреши) и сейсмического цикла. Основы метода и большой опыт его применения, которые кратко рассматривались во Введении и разделе 1, изложены в монографии [Федотов, 2005], статьях [Федотов и др., 2004, 2007, 2008₂], а также в других работах.

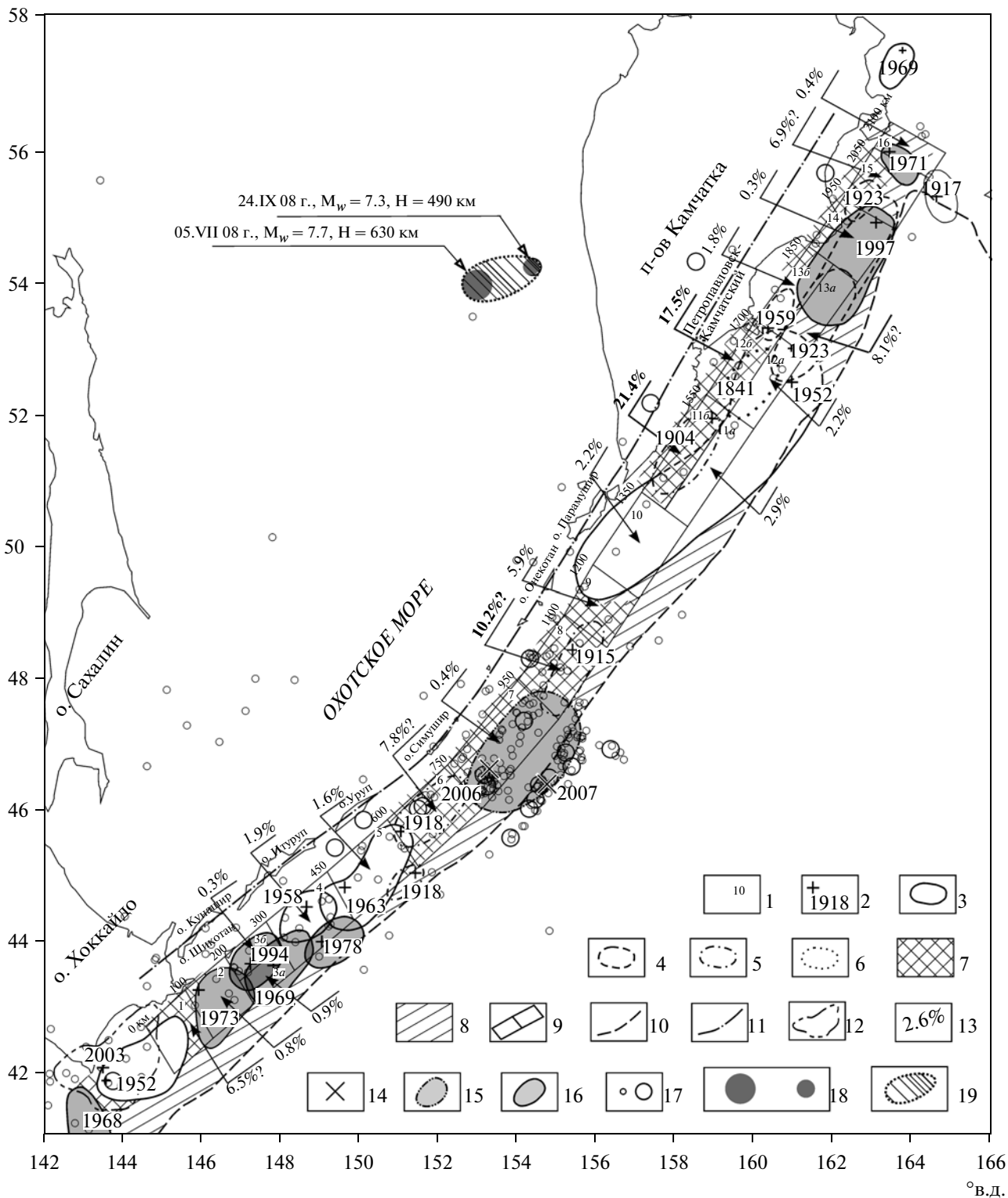
Прогноз составлен на следующие пять лет, XI 2010–VIII 2015 гг., в обновление предыдущего такого прогноза, составленного 18.III 2010 г. на III 2010–II 2015 гг. Исходные данные взяты из региональных каталогов КФ и СФ ГС РАН (<ftp://ftp.gsras.ru>) за VIII 2005–VIII 2010 гг. Результаты приведены на рис. 3 и в таблицах 2–4. Табл. 2 рассчитана по графикам сейсмического цикла параметров A_{10} и D . Табл. 3 построена на основе параметра A_{11} . В табл. 4 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} . В табл. 2 и 4 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 III 2010–II 2015 гг.

На рис. 3 представлена карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IX 2010–VIII 2015 гг., а также эпицентры землетрясений, произошедших в период VIII 2005–VIII 2010 гг. с $m_b \geq 5.0$ (каталоги NEIC и IRIS). В связи с произошедшим 5.VII 2008 г. глубоким сильнейшим ($H = 630$ км, $M_w = 7.7$) землетрясением, которое могло вызвать усиление сейсмичности под Южной Камчаткой, на карту нанесены и эпицентры землетрясений с $H > 80$ км.

Эпицентры землетрясений Курило-Камчатской дуги, происходивших IX 2005–VIII 2010 гг. на глубинах $H = 0–80$ км, нанесены на рис. 2, а на глубинах $0–500$ км – на рис. 3.

В последние 15 лет (1995–2010 гг.) возле пяти из восьми выделенных сейсмических брешей происходили землетрясения с $M \geq 7.7$, см. рис. 3: возле участка 1 – Хоккайдское землетрясение 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; между участками 6 и 8 – Средне-Курильское землетрясение 15.XI 2006 г., $M = 8.2$; между участками 13а и 15 – Кроноцкое землетрясение 5.XII 1997 г., $M = 7.9$. Из-за этого величины параметров A_{10} и D , определенные по данным за предшествующие 5 лет, и особенно параметра A_{11} , определяющегося по данным за предшествующие 15 лет, а также соответствующие величины вероятностей возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$ могут быть завышены. Та-

°С.Ш.



кие значения $P(M \geq 7.7)$ отмечены знаком вопроса в табл. 2–4.

На рис. 3 нанесены величины $P(M \geq 7.7)$, рассчитанные по данным всех трех параметров, A_{10} и D и A_{11} .

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2010–VIII 2015 гг. по всем 20 участкам, на которые разделена сейсмогенная зона у Курильских островов и Камчатки (см. рис. 3, табл. 4), заключаются в следующем.

Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ на период IX 2010–VIII 2015 гг. остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловска-Камчатского:

– для южной Камчатки (см. рис. 3, участок 11б) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, равна 21.4%;

– для Авачинского залива (см. рис. 3, участок 12б) вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ на IX 2010–VIII 2015 гг., имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловске-Камчатском – 17.5%;

– для юго-восточной части Кроноцкого залива (см. рис. 3, участок 13а) вероятность землетрясения $M \geq 7.7$, имеющего силу до 7 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, равна 8.1%; за последнее пятилетие сейсмическая опасность, определяемая величиной параметров A_{10} , D и A_{11} , в нем уменьшилась с 6.7–10.6% (см. табл. 1) до 0.7–8.1% (см. табл. 2 и 4), и, таким образом, до настоящего времени в этом участке не исключено (хотя и значительно ослаблено) влияние афтершоков Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.9$;

– в участке 15 опасность сильнейшего землетрясения является самой низкой в сейсмических брешах на Камчатке и 6-й по степени опасности во всей Курило-Камчатской дуге; за последнее пятилетие сейсмическая опасность в нем, как и в участке 13а, снизилась с 9.3–8.1% (см. табл. 1) до 5.2–6.9% (см. табл. 2 и 4) из-за уменьшения влияния афтершоков Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.9$.

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 47.0% (см. рис. 3, табл. 4).

Землетрясения, имеющие силу 7–8 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, с меньшей вероятностью могут также произойти в участках 11а, 12а, 13б (см. рис. 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 54.0% в период времени IX 2010–VIII 2015 гг. (см. табл. 4). При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловске-Камчатском землетрясения силой 9 баллов равняется 17.5%, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 36.5%.

На Курильских островах высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (см. рис. 3, табл. 4, участки 6, 8 и 9). Общая вероятность сильнейшего землетрясения в них составляет 23.8%.

Значение вероятности сильнейшего землетрясения в участке 8 (см. рис. 3, табл. 4) на период IX 2010–VIII 2015 гг. является третьим по величине во всей Курило-Камчатской дуге и равно 10.2%, а в участке 6 – пятым по величине (7.8%). При этом считается, что уровень сейсмической активности участков 6 и 8 в настоящее время равен их среднему долговременному значению. Краткосрочные роевые активизации 2009 г. в них не являются в рамках используемого метода прогностическим признаком и при расчетах не учитываются.

За последнее пятилетие произошло снижение вероятности землетрясения с $M \geq 7.7$ для участка 1 – п-ов Немуро (см. рис. 3). Вследствие ослабления влияния афтершоков Хоккайдского землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$, за данный период она уменьшилась с 11.4–10.3% (см. табл. 1) до 3.7–6.5% (см. табл. 2 и 4). В настоящее время этот участок стал седьмым в Курило-Камчатской дуге по степени

Рис. 3. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IX 2010–VIII 2015 гг., очагов курило-камчатских землетрясений 1904–2010 гг. с $M \geq 7.7$, $H = 0–80$ км, и вероятностей возникновения таких землетрясений в IX 2010–VIII 2015 гг. во всех участках полосы прогноза: 1 – номер участка; 2 – инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 – границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 – участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 – вероятные области очагов землетрясений 1904–1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6 – 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 2010–VIII 2015 гг., см. табл. 4; 14 – эпицентры Средне-Курильских землетрясений 15.XI 2006 г., $M_W = 8.3$, и 13.I 2007 г., $M_W = 8.1$; 15 – область очага предсказанного землетрясения 15.XI 2006 г.; 16 – области очагов других землетрясений с $M \geq 7.7$, которые произошли после 1965 г. в предсказанных “сейсмических брешах”; 17 – эпицентры землетрясений, произошедших в период 12.VIII 2005–11.VIII 2010 гг., меньший кружок, соответствует $5.0 \leq m_b < 6.0$, больший – $6.0 \leq M < 8.0$, $H = 0–500$ км (каталог NEIC); 18 – эпицентры землетрясения 5.VII 2008 г., $M_W = 7.7$, $H = 630$ км (большой круг) и его главного афтершока с $M_W = 7.3$, $H = 490$ км; 19 – проекция вероятной области очага землетрясения 5.VII 2008 $M_W = 7.7$, $H = 630$ км (каталоги NEIC и IRIS). Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6–4.2%.

Таблица 2. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010–VIII 2015 гг. ($H \leq 80$ км), построенный по параметрам A_{10} и D

Участок, №	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2005–2010 гг. (VII 2005–VIII 2010 гг.)				Прогноз на IX 2010–VIII 2015 гг.							Вероятная очередность		
			Статия	P(A)	P(D)	$B = P(A) \cdot P(D)$	M									
							A_{10}	$A_{10} \pm \sigma$	$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	M_{Max}	$P_1 (M \geq 7.7) \%$			
1	0–100	Мыс Сириха–п-ов Немуро	III	0.82	0.99	0.82	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	3.7	(7.8)	7	(4)
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				0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		0.9	(0.9)		
3б	200–300	О-в Шикотан, С-3	I				1.2	0.8–4.5	6.0	6.4	6.9		0.3	(0.3)		
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 Уруп	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	7.8?	(0.7?)	4?	(8)
7	750–950	О-в Симушир–пролив Крузенгерна	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	0.74	0.56	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	13.7?	(19.3?)	3?	(3)
9	1100–1200	О-в Онекотан–пролив 3-й Курильский	III	0.67	0.99	0.67	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	6.8	(6.2)	5	(6)
10	1200–1350	О-в Парамушир–мыс Лопатка	II				1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.2	(2.2)		
11а	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II				0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		2.9	(2.9)		
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-3	III	0.75	0.59	0.44	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	23.0	(21.0)	2	(2)
12а	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, Ю-В	II				0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		2.2	(2.2)		
12б	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, С-3	III	0.36	0.66	0.24	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	23.5	(21.7)	1	(1)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.99	0.98	0.98	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	0.7	(1.2)	8	(7)
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-3	II				1.2	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9		1.8	(1.8)		
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	I				1.2	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0		0.3	(0.3)		
15	1950–2050	Зал. Камчатский	III?	0.76	0.98	0.75	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	5.2?	(6.3)	6	(5)
16	2050–2100	П-ов Камчатский	II	0.062	0.308	0.019	0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		0.4	(0.4)		
		Оценка критических значений вероятностей												$\Sigma = 100$	(100)	

Примечание. В табл. даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на IX 2010–VIII 2015 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 участки, в которых вероятность такого события меньше. I – В – параметр, показывающий относительную опасность “сейсмических брешей”; A_{10} – сейсмическая активность; $P \sim 0.8, 0.5, 0.15$ – вероятности землетрясений с $M = 5.7-7.2; M_{Max}$ – максимальная возможная магнитуда; $P_1 (M \geq 7.7)$ – прогнозируемые вероятности сильнейших землетрясений. Значения вероятности $P_1 (M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их величинам на III 2010–II 2015 гг. Средняя долговременная величина $P_1 (M \geq 7.7) = 3.6-4.2\%$.

Таблица 3. Оценки вероятности P_{11} землетрясений с магнитудой $M \geq 7.7$ Курило-Камчатской дуги на IX 2010–VIII 2015 гг. ($N \leq 80$ км), полученные по параметру A_{11} для “сейсмических брешей”

Участок, №	Δ , км	Район	$P_{11}(M \geq 7.7)\%$	Вероятная очередность
1	0–100	Мыс Сириха–п-ов Немуро	10.3? (3.7)	3–4 (7)
6	600–750	Мыс Кастрикум–пр. Буссоль	5.6? (7.8?)	6–7 (4?)
8	950–1100	О-в Шиашкотан	4.9? (13.7?)	8 (3?)
9	1100–1200	О-в Онекотан–пролив 3-й Курильский	5.6 (6.8)	6–7 (5)
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-3	17.4 (23.0)	2 (2)
12б	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, С-3	20.0 (23.5)	1 (1)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	10.3? (0.7)	3–4 (8)
15	1950–2050	Зал. Камчатский	10.1? (5.2)	5 (6)
			$\Sigma = 84.3$	

Примечание. Цифры в скобках – соответствующие оценки $P(M \geq 7.7)$ а также вероятная очередность, определенные по параметрам A_{10} и D , из табл. 2. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6–4.2\%$. Разница в оценках 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 $P_{11}(M \geq 7.7)$ могут быть завышены в участках 1, 6, 8, 13а и 15 из-за влияния происшедших в них форшоковых и афтершоковых процессов Хоккайдского землетрясения 25.IX 2003 г., $M = 8.1$, Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, и Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8$.

опасности, в нем $P(M \geq 7.7) = 6.5\%$ в IX 2010–VIII 2015 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%.

Главным выводом данного долгосрочного сейсмического прогноза является подтверждение того, что на следующие пять лет, XI 2010–VIII 2015 гг., сохраняется очень высокая сейсмическая опасность в районе г. Петропавловска-Камчатского, где вероятность возникновения разрушительного землетрясения силой 7–9 баллов в эти годы достигает 54.0% (48.6% по прогнозу на IX 2005–IX 2010 гг.). В полной мере сохраняется необходимость неотложных мер по сейсmobезопасности и сейсмоусилению в Камчатском крае.

Необходимо заметить также, что увеличение оценки сейсмической опасности $P(M \geq 7.7)$ в районе г. Петропавловска-Камчатского за пятилетие с 48.6% до 54.0% отчасти связано с исключением из суммарной опасности для всех брешей дуги ее величины для участка 7. Этот участок находился во второй по опасности в 2005 г. сейсмической брешы в районе Средних Курильских о-вов (см. рис. 1, участки 6–9), а после землетрясений 15.XI 2006 г., $M = 8.2$ и 13.I 2007 г., $M = 8.1$ стал проходить I стадию сейсмического цикла.

В то же время, за этот период уменьшилось влияние афтершоков Кроноцкого (5.XII 1997 г., $M = 7.9$) и Хоккайдского (25.IX 2003 г., $M = 8.1$) землетрясений в участках, прилегающих к их очагам, что привело к некоторому уточнению оценок $P(M \geq 7.7)$ для всех участков.

3. ДОПОЛНЕНИЕ К ПРОГНОЗУ НА IX 2010–VIII 2015 гг. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗА. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

3.1. Долгосрочный прогноз по сумме выделившейся сейсмической энергии

Ниже приводятся данные о возможности уточнения долгосрочного сейсмического прогноза с использованием метода, основанного на свойствах процесса накопления и сброса сейсмической энергии.

Прежде всего, необходимо заметить, что одно из основных понятий, используемых в методе долгосрочного сейсмического прогноза, “сейсмический цикл”, предполагает периодический характер накопления и сброса упругой энергии в различных участках сейсмогенной зоны между сильнейшими ($M \geq 7.7$) землетрясениями в них [Федотов, 1965, 1968]. Во время таких землетрясений выделяется основная часть накопленной энергии. Между последовательными сильнейшими землетрясениями (в основном на II, спокойной, стадии сейсмического цикла) при относительно низкой сейсмической активности происходит накопление сейсмической энергии.

График суммарной выделившейся сейсмической энергии $\Sigma E(t)$, где E – сейсмическая энергия, t – время, представляет собой ступенчатую линию. Ее средний за длительный период времени наклон определяется длиной рассматриваемой части Курило-Камчатской дуги и долговременной интенсивностью региональных тектонических процессов, которая в первом приближении может считаться одинаковой вдоль всей Курило-Камчатской дуги.

Таблица 4. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010–VIII 2015 гг. ($N \leq 80$ км), полученный с использованием параметров A_{10} , D , A_{11}

Участок	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2005–2010 гг. (VIII 2005–VIII 2010 гг.)					Прогноз на IX 2010–VIII 2015 гг.						Вероятная очередность			
			Статия	$P_1 = P(A_{10})$	$P_2 = P(D)$	$P_3^{11} = P(A_{11})$	$V = (P_1 * P_2 * P_3^{11})$	$A_{10}(P \sim 0.7)$		$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	M_{Max}		$P_2(M \geq 7.7)\%$		
								A_{10}	$A_{10} \pm \sigma$								
1	0–100	Мыс Сириха–п-ов Немуро	III	0.82	0.99	0.56	0.46	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	6.5?	(7.9)	7	(5)
2	100–200	П-ов Немуро–о-в Зелёный	II					1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.8	(0.8)		
3а	200–300	О-в Шикоган, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		0.9	(0.9)		
3б	200–300	О-в Шикоган, С-З	I					1.2	0.8–4.5	6.0	6.4	6.9		0.3	(0.3)		
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 Уруп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.6	(1.6)		
6	600–750	Мыс Кастрикум–пр. Буесоль	III?	0.75	0.99	0.77	0.57	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	7.8?	(2.8?)	5?	(8)
7	750–950	О-в Симушир–пр. Крузенгерна	I					7.5→2.6	10.6–4.6	6.2	6.7	7.2		0.4	(0.4)		
8	950–1100	О-в Шиашкоган	III?	0.75	0.74	0.79	0.44	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	10.2?	(14.1?)	3?	(3)
9	1100–1200	О-в Онекоган–пр. 3-й Курильский	III	0.67	0.99	0.76	0.51	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	5.9	(5.8)	8	(7)
10	1200–1350	О-в Парамушир–мыс Лопатка	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.2	(2.2)		
11а	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		2.9	(2.9)		
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.75	0.59	0.27	0.12	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	21.4	(21.1)	1	(1)
12а	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.7	6.2	6.7		2.2	(2.2)		
12б	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, С-З	III	0.36	0.66	0.16	0.04	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	17.5	(17.1)	2	(2)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.99	0.98	0.56	0.55	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	8.1?	(8.3)	4	(4)
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-З	II					1.2	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9		1.8	(1.8)		
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	I					1.2	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0		0.3	(0.3)		
15	1950–2050	Зал. Камчатский	III?	0.76	0.98	0.57	0.43	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	6.9?	(7.3)	6	(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													$\Sigma = 100.0$				

Примечание. См. обозначения в табл. 2. Выделены оценки вероятности сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ и их очередность. Значения вероятности $P_2(M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их величинам на III 2010–II 2015 гг.

В случае строго циклического, стабильного сейсмического процесса полоса, охватывающая ступеньки соответствующего графика, определяет минимальное и максимальное из возможных значений накопленной в каждый момент времени сейсмической энергии. В таком случае возможен точный прогноз предельных времени и энергии следующего сильнейшего землетрясения по известным границам полосы накопления — сброса сейсмической энергии и положению последней известной точки внутри нее.

Реальный сейсмический процесс определяется, во-первых, наличием нескольких относительно независимых процессов в разных очагах сильнейших землетрясений, во-вторых, наличием множества факторов, делающих каждый из этих процессов нерегулярным как по величине сброшенной упругой энергии, так и по периоду сброса накопившейся энергии в каждом из этих очагов. Но даже в этом случае, учитывая баланс сбрасываемой $\Sigma E(t)$ и накапливаемой энергии, а также физические пределы ее максимальной величины, необходимо предположить наличие определенных максимальных и минимальных значений в виде полосы, ограничивающей график $\Sigma E(t)$. Описание физических моделей для такого подхода изложено в работах [Касахара, 1985] и [Mogi, 1985].

Успешный прогноз на основе кумулятивных графиков выделившейся сейсмической энергии для Камчатки и Курильских о-вов был дан в [Федотов и др., 1987]. В этой работе на основе анализа зависимостей $\Sigma E(t)$ сделан вывод, что сейсмическое затишье, отсутствие сильнейших землетрясений, на Камчатке вряд ли продлится дольше, чем до 1995–2000 г. Этот прогноз успешно оправдался: почти в середине этого интервала 5.XII 1997 г. произошло Кроноцкое землетрясение с $M = 7.8–7.9$.

Построение прогноза с оценкой наиболее вероятных периодов и максимальных магнитуд следующего сильнейшего землетрясения в данной работе проводилось как для всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, так и отдельно для каждой части — Курильской и Камчатской. Были использованы следующие каталоги землетрясений: “Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР” [Новый каталог ..., 1977] — с 1900 по 1975 гг.; Каталог Северной Евразии под ред. В.И. Уломова, Н.В. Кондорской* с 1900 по 1995 гг.; мировой каталог землетрясений (NEIC)**: с 1996 по 2009 гг.

При построениях использовались землетрясения из этих каталогов с $M = M_S > 7$ и глубинами $H < 100$ км. Магнитуда $M = 7.1$ определена в качестве общего нижнего уровня представительности каталога для его Камчатской и Курильской частей за

весь период. При этом, как было оценено на основе Каталога Северной Евразии (<http://socrates.wdcb.ru/scetac/>) и анализа графиков повторяемости Курило-Камчатских землетрясений, учитывается около 93% всей выделяемой сейсмической энергии.

К Камчатской части сейсмогенной зоны, протянувшейся от стыка с Алеутской дугой вдоль восточного побережья Камчатки, отнесена также южная часть области очага гигантского Камчатского землетрясения 4.XI 1952 г., $M = 8.5$ (до о-ва Онекотан). Курильской части, расположенной восточнее Курильских островов, отнесено также ее продолжение возле юго-восточного побережья о. Хоккайдо с очагами землетрясений 4.III 1952 г., $M = 8.3$ и 25.IX 2003 г., $M = 8.1$. (Карта Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и областей очагов сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ приведена на рис. 1–3).

На рис. 4 представлены данные по суммам $\Sigma E(t)$ для Камчатского (общая протяженность 950 км) и Курильского (длина 1300 км) участков Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Сейсмическая энергия E оценивалась по формуле: $\lg(E, \text{Дж}) = 1.5 \cdot M + 4.6$ [Федотов и др., 1987].

В предположении однородности сейсмического процесса вдоль всей Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны данные по Курильскому участку нормированы на величину 950/1300. Необходимо заметить, что совмещение обоих графиков в точке 1900 условное. Оно, по-видимому, оправдано, так как в первую половину рассматриваемого промежутка времени (до 1952 г.) графики близки.

Наибольшее различие в ходе данных графиков (см. рис. 4) наблюдается после гигантского Камчатского землетрясения 4.XI 1952 г., $M = 8.5$ и сильнейшего землетрясения на Курильском участке 4.III 1952 г., $M = 8.3$. На Курильском участке сейсмическая энергия после этих событий в дальнейшем выделялась в достаточной степени равномерно десятью землетрясениями с $M = 7.7–8.2$. На Камчатском участке в период 1953–2009 гг. наблюдалось общее относительное затишье. В этот период здесь произошло лишь два землетрясения с $M = 7.8–7.9$ (15.XII 1971 г., $M = 7.8$ и 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$) и одно землетрясение с магнитудой 7.6–7.7 (4.V 1959 г.).

На рис. 5 представлены данные по суммарному выделению сейсмической энергии для всей Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны, включая ее продолжение возле юго-западного побережья о. Хоккайдо с очагами землетрясений 4.III 1952 г., $M = 8.3$ и 25.IX 2003 г., $M = 8.1$. Средняя сейсмическая энергия, выделяемая в год во всей Курило-Камчатской дуге, была определена на основе ее полной суммы за 110 лет. Полученное таким образом среднее значение выделения сейсмической энергии равно $16.3 \cdot 10^{15}$ Дж/год, что соответствует одному землетрясению с $M = 7.7$ в год. Можно отметить достаточно хорошую аппроксимацию линии

* <http://socrates.wdcb.ru/scetac>

** <http://neic.usgs.gov>

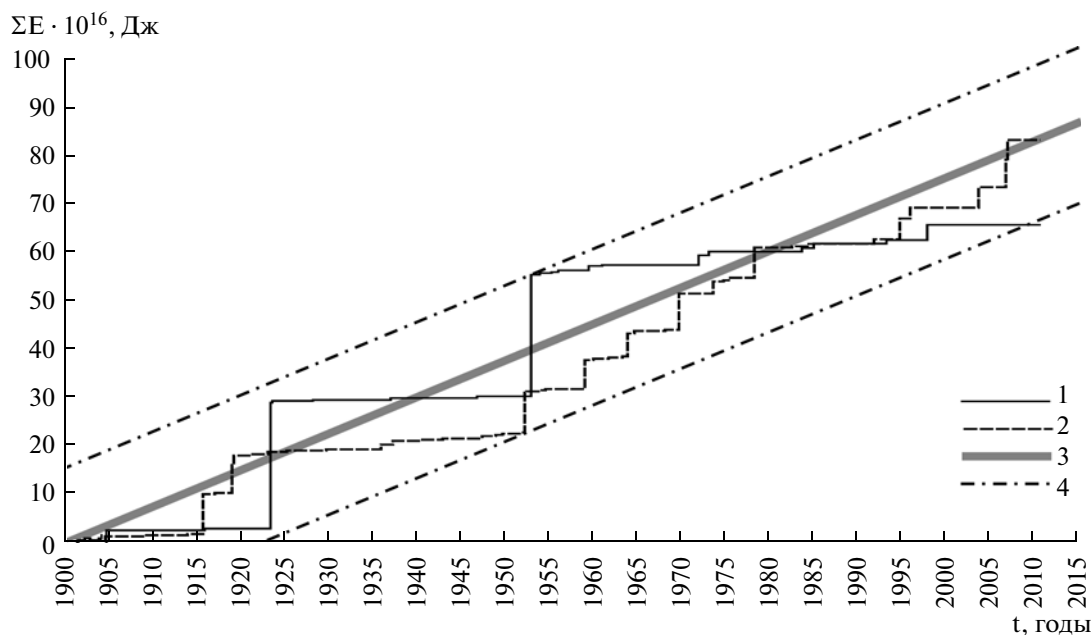


Рис. 4. Суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E(t)$, выделившаяся в 1900–2010 гг. при землетрясениях с $M > 7.0$, $N < 100$, в Камчатской части Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, и суммарная энергия Курильской части, нормированная с учетом отношения размеров этих частей, 950 и 1300 км: 1 – график $\Sigma E(t)$ для Камчатки; 2 – аналогичный график для Курильских островов, нормированный в соответствии с соотношением размеров Курильской и Камчатской частей; 3 – линия, соответствующая средней скорости выделения сейсмической энергии по данным для Курильской части дуги; 4 – минимальный и максимальный уровни, представленные отклонениями от средней линии во время подготовки и возникновения сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги.

ями с таким наклоном верхней и нижней границ ступенчатых вариаций графика (см. рис. 5). Параллельные линии, пересекающие ось времени t в точках 1904 г. и 1913 г., могут служить крайними нижними границами для данного графика. В этом случае предельная дата следующего сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения во всей Курило-Камчатской дуге с энергией, соответствующей накопленной перед гигантским землетрясением 3.II 1923 г., $M = 8.5$ или двумя землетрясениями с $M = 8.3$ и $M = 8.5$, 4.III 1952 г. и 4.XI 1952 г., находится в интервале 2015–2023 гг. (см. рис. 5).

На рис. 6 представлены данные по суммарной сейсмической энергии с 1900 г. для землетрясений Курильской части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Как и для всей зоны в целом, в данном случае можно определить среднюю величину выделяемой сейсмической энергии – $10.4 \cdot 10^{15}$ Дж/год, что составляет 0.64 от значения, определенного для всей дуги. Так как выбранная длина Курильской части, 1300 км, составляет 0.58 от общей длины зоны, 2250 км, близкие значения этих величин подтверждают однородность процесса накопления – сброса упругой энергии вдоль всей Курило-Камчатской дуги. По данным рис. 6, предельная дата следующего сильнейшего ($M = 7.7$ – 8.5) землетрясения, к которой может быть накоплена энергия, эквивалентная серии трех сильнейших курильских землетрясений 1915 и 1918 гг., для данной части дуги – около 2022 гг.

Средняя скорость накопления – сброса сейсмической энергии в Камчатской части равна $6.0 \cdot 10^{15}$ Дж/год. Энергия, эквивалентная гигантскому Камчатскому землетрясению 4.XI 1952 г. $M = 8.5$, в данном участке уже накоплена к настоящему времени (рис. 7). Следующее землетрясение с $M \geq 7.7$ должно возникнуть до 2015 г. (см. рис. 7), а с наибольшей вероятностью, как будет пояснено далее – в 2011–2012 гг. В противном случае к 2027 г. может быть накоплена энергия, эквивалентная энергии двух гигантских землетрясений у побережья Камчатки в 1923 и 1952 гг.

В ряде случаев вместо одного сильнейшего землетрясения с магнитудой $M > 8.3$ возникает серия более слабых землетрясений с $M \geq 7.7$. Такими были серия курильских землетрясений 1958–1978 гг. и менее выраженная серия камчатских землетрясений 1959–1997 гг. (см. рис. 4–6). Во время этих серий наблюдаются более узкие полосы значений графиков $\Sigma E(t)$. Изменение наклона ограничивающих максимального и минимального уровней, показывает также изменение средней скорости выделения сейсмической энергии в этих сериях (см. рис. 5–7). Экстраполяция такой полосы для $\Sigma E(t)$ камчатских землетрясений 1959–1997 гг. показывает вероятное время следующего сильнейшего землетрясения в пределах Камчатского участка – 2011–2012 гг., при этом ожидаемая магнитуда равняется $M = 7.7$ – 8.0 (см. рис. 7). Однако, при огромной накопленной

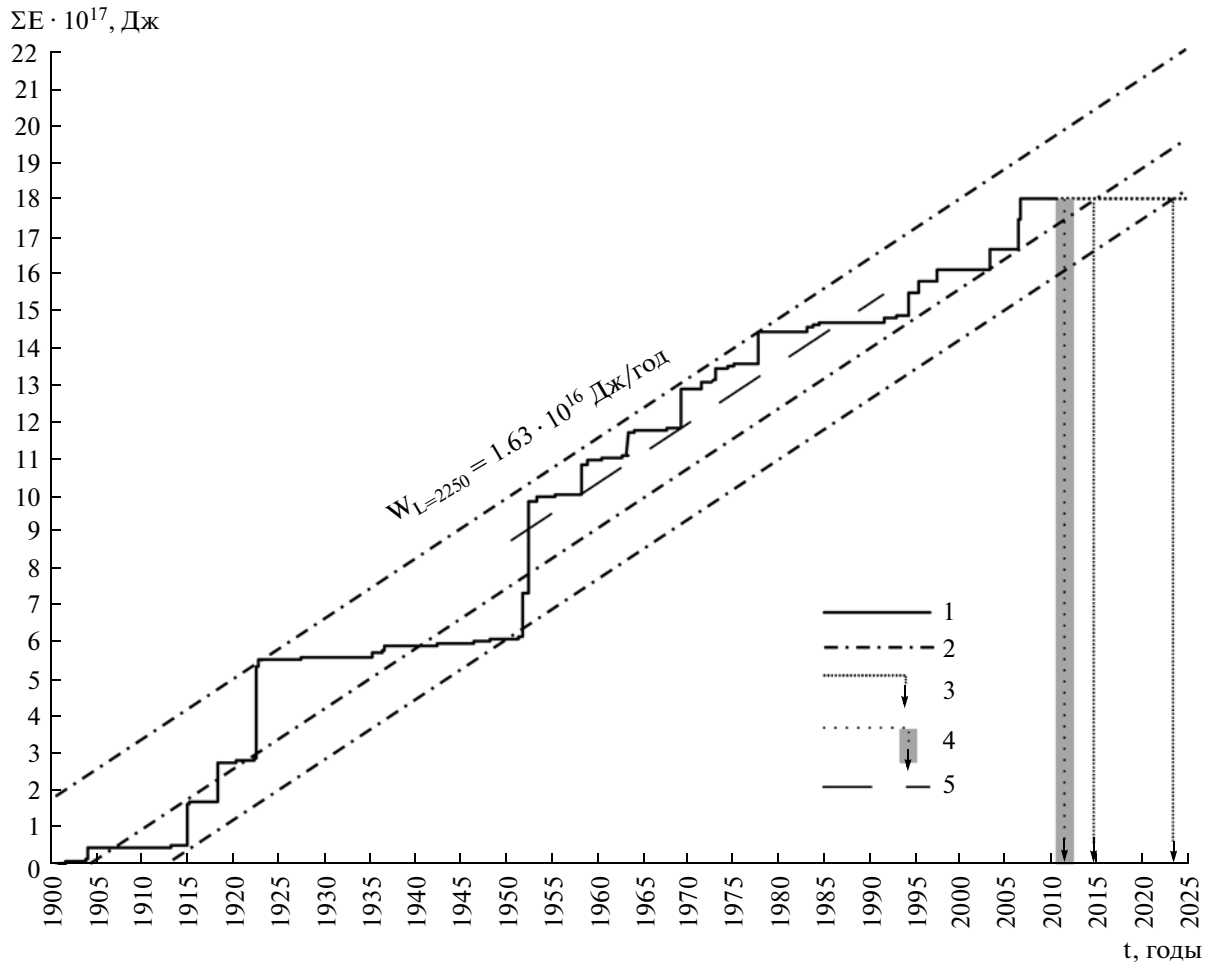


Рис. 5. Суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E(t)$, высвобожденная в 1900–2010 гг. при землетрясениях с $M > 7.0$, $H < 100$ в пределах всей Курило-Камчатской дуги (включая ее продолжение возле юго-западного побережья о. Хоккайдо с очагами землетрясений 4.III 1952 г., $M = 8.3$ и 25.IX 2003 г., $M = 8.1$), см. рис. 1–3: 1 – график $\Sigma E(t)$ для всей дуги; 2 – минимальные и максимальный его уровни (наклон определен по средней скорости выделения сейсмической энергии); 3 – оценки среднего и максимального времени следующего сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения, определенная по периодичности сильнейших землетрясений с $T = 5.06$ года (пояснения см. в тексте ниже и на рис. 8), серым фоном указано стандартное отклонение; 4 – вероятная оценка времени следующего сильнейшего землетрясения, определенная по периодичности сильнейших землетрясений с $T = 5.06$ года (пояснения см. в тексте ниже и на рис. 8), серым фоном указано стандартное отклонение; 5 – нижняя граница полосы, ограничивающей группу землетрясений 1952–1978 гг., см. также рис. 6.

энергии возможно землетрясение большей силы, захватывающее всю сейсмическую брешь возле побережья Южной Камчатки и Авачинского залива (см. рис. 3, участки 11б и 12б).

На рис. 8 представлены данные о временах – t и общем числе $N(t)$ землетрясений с $M \geq 7.7$ в пределах Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны, за исключением землетрясения 15.XII 1971 г. $M = 7.8$, расположенного на стыке Алеутского и Курило-Камчатского желобов. Некоторые интервалы времени между землетрясениями были меньше одного года, в таких случаях землетрясения считались зависимыми и рассматривались как одно событие. Из приведенных данных (см. рис. 8) видно, что интервал времени между землетрясениями с $M \geq 7.7$, близкий к 5 годам, является преобладающим в их сериях и представлен тремя группами от четырех до

шести событий. Вероятно продолжение серии землетрясений 1994–2007 гг. во всей Курило-Камчатской зоне. Приближенная оценка времени следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ и глубиной меньше 100 км при таком предположении оказывается близкой к дате – XII 2011 г. со стандартной ошибкой ± 1 год. Это согласуется с оценками, полученными выше для Камчатского участка (см. рис. 7).

Вероятное время следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ в пределах Курильской части можно оценить по интервалам между последовательными землетрясениями в ней. На рис. 9 представлена аппроксимация интервалов времени между последовательными землетрясениями с $M \geq 7.7$ и $H < 100$ км Курильской части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны с 1900 по 2009 гг. экспоненциальным распределением с характерным временем 7.2 года

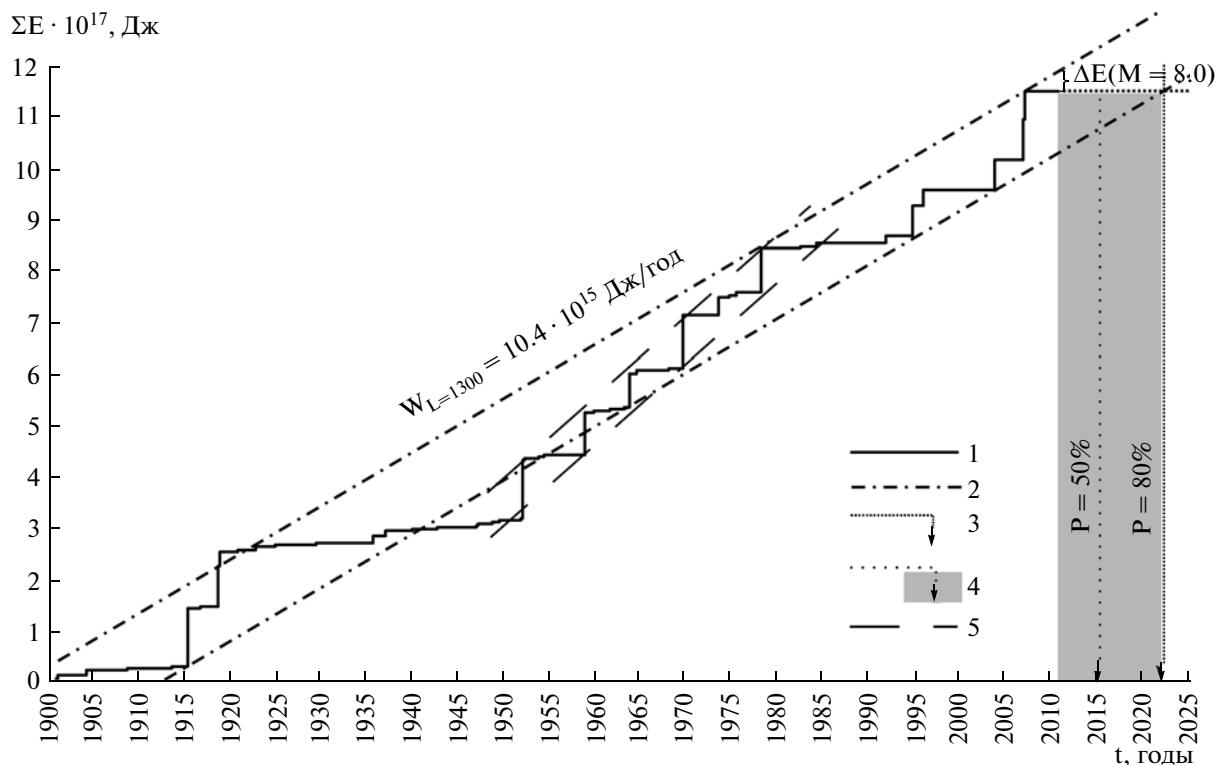


Рис. 6. Суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E(t)$, высвобожденная в 1900–2010 гг. при землетрясениях с $M > 7.0$, $H < 100$ в пределах Курильской части сейсмогенной зоны (включая продолжение возле юго-западного побережья о. Хоккайдо с очагами землетрясений 4.III 1952 г., $M = 8.3$ и 25.IX 2003 г., $M = 8.1$), см. рис. 1–3: 1 – график $\Sigma E(t)$; 2 – минимальные и максимальный его уровни; 3 – оценки среднего и максимального времен следующего сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения; 4 – 50% граница интервала для момента следующего сильнейшего землетрясения, серым фоном указан 80% интервал (пояснения см. в тексте ниже и на рис. 9); 5 – границы полосы, представленной группой землетрясений 1952–1978 гг., см. также рис. 5.

(аналогичный график для всей Курило-Камчатской дуги приведен в работах [Федотов и др., 2007]). На основе данной модели на рис. 6 приведены 50%-ные (2010–2015 гг.) и 80%-ные (2010–2022 гг.) прогнозные интервалы времени следующего сильнейшего землетрясения в Курильской части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Верхняя граница этой оценки приблизительно соответствует верхней границе для ожидаемого землетрясения во всей Курило-Камчатской дуге (см. рис. 5).

Общие выводы из приведенных выше приближенных оценок раздела 3.1.

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 11б и 12б (см. рис. 3). Вероятное время такого землетрясения – XII 2011 г.

при стандартной ошибке ± 1 год. Эти данные согласуются с долгосрочным сейсмическим прогнозом по методу С.А. Федотова, последний уточненный вариант которого приведен в разделе 2.

Для Курильской части в настоящее время уже накоплена энергия, достаточная для землетрясения с магнитудой 8.0, и существует 50%-ная вероятность сильнейшего землетрясения в этом участке на следующие 5 лет. Данная оценка несколько завышена. Более точная оценка вероятности, согласно разделу 2, – около 33%.

3.2. Влияние сильных глубоких землетрясений

Важным событием за период IX 2005–VIII 2010 гг. было редкое сильнейшее глубокое ($H = 630$ км) землетрясение под дном Охотского моря. Оно произошло 5.VII 2008 г. напротив участков 11 и 12 сейсмофокальной зоны у побережья Южной Камчатки и Авачинского залива (см. рис. 2 и 3) и имело магнитуду $M_W = 7.7$. 24.XI 2008 г. на глубине 490 км произошел его мощный афтершок с $M_W = 7.3$.

Глубокие землетрясения такой магнитуды – редкое явление для Курило-Камчатского региона. Последнее такое землетрясение здесь было зарегистрировано более ста лет назад, 11.VI 1902 г., имело

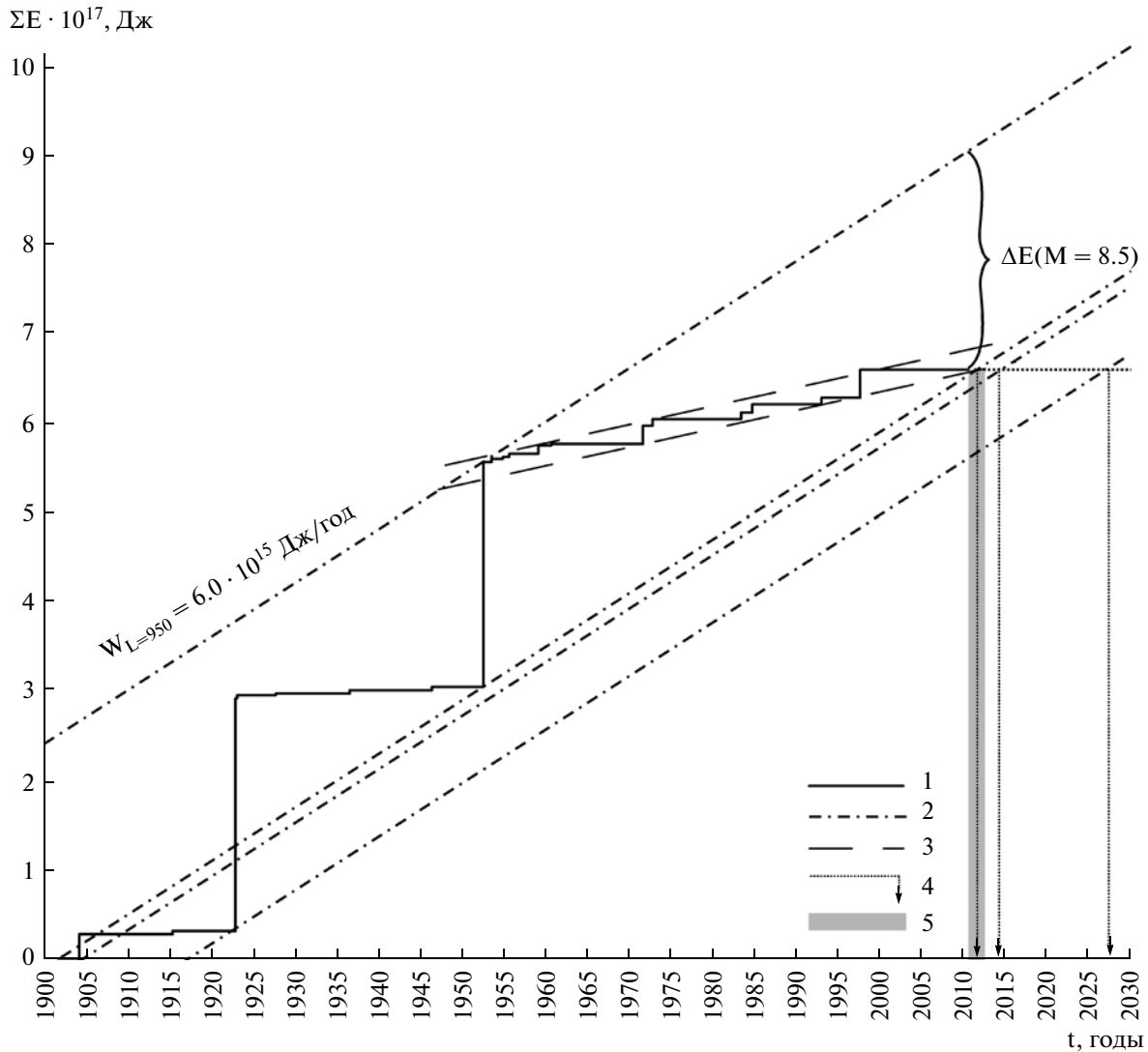


Рис. 7. Суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E(t)$, выделенная в 1900–2010 гг. при землетрясениях с $M > 7.0$, $N < 100$ в пределах Камчатской части сейсмогенной зоны: 1 – график $\Sigma E(t)$; 2 – минимальные и максимальный его уровни; 3 – границы полосы, представленной группой землетрясений 1952–1997 гг.; 4 – варианты оценок времени следующего сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения, пояснения – в тексте; 5 – 67% доверительный интервал времени следующего сильнейшего землетрясения по всей Курило-Камчатской дуге по данным о сериях землетрясений (см. рис. 8).

магнитуду $M = 8.0$ и глубину 500–700 км. Согласно исследованиям К. Моги, подобные землетрясения могут за несколько лет предвещать сильнейшие неглубокие землетрясения [Mogi, 1985].

Неглубокое землетрясение с $M = 6.1$, произошедшее 24.VII 2008 г., возле границы участка 11б (см. рис. 2 и 3), могло быть отдаленным откликом на сильнейшее глубокое землетрясение 5.VII 2008 г. Таким образом, само указанное глубокое землетрясение и отклик на него в районе сейсмической брешы, образованной участками 11б и 12б (см. рис. 1–3, табл. 1–4), являются дополнительным указанием на высокую вероятность сильнейшего землетрясения в этих участках в последующие годы (раздел 2).

3.3. Сопоставление и сочетание с другими методами прогноза

Большие многосторонние исследования по сложной проблеме прогноза землетрясений ведутся более 110 лет [Рикитакэ, 1979; Соболев, 1993; Mogi, 1985 и др.]. Изучаются закономерности сейсмической деятельности, механизм очагов землетрясений, различные предвестники, разрабатываются методы долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений. Созданы апробированные методы долгосрочного сейсмического прогноза [Федотов, 1965, 1968, 2005; Кейлис-Борок, Кособоков, 1986; Кособоков, 2005; Nishenko, 1991 и др.]. Имеются отдельные успехи в краткосрочном прогнозе землетрясений [Соболев, Пономарев,

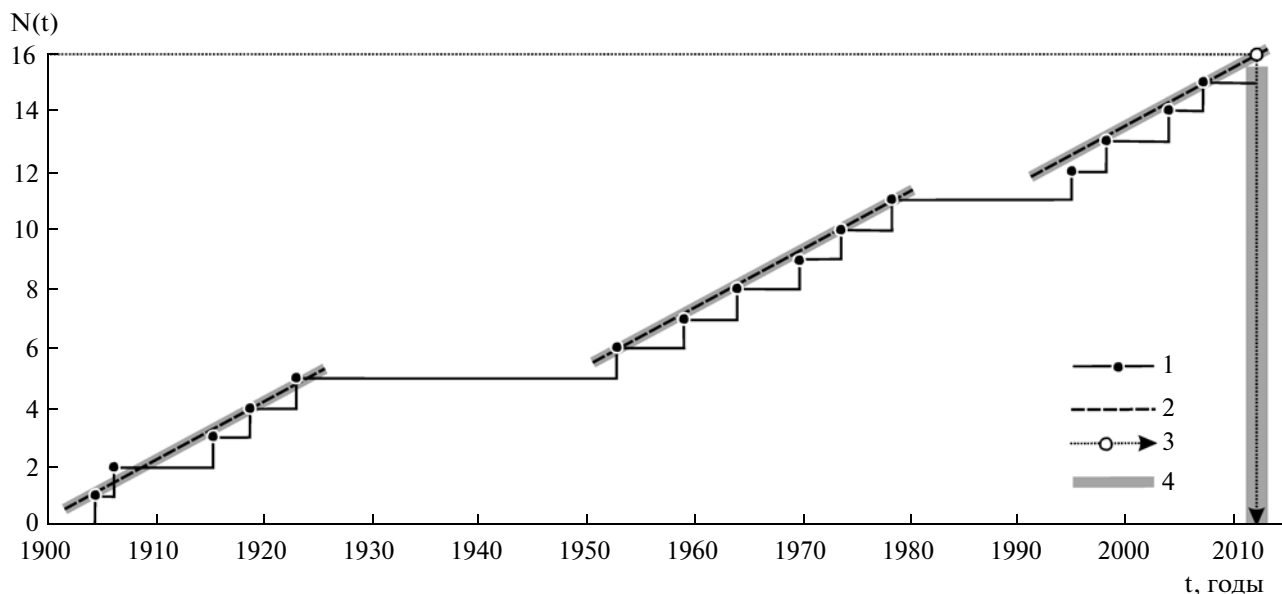


Рис. 8. Суммарное количество $N(t)$ сильнейших ($M \geq 7.7$), $N < 100$, землетрясений Курило-Камчатской дуги по времени с 1900 по 2010 гг.: 1 – времена землетрясений; 2 – линейные приближения в предположении о квазипериодичности повторения землетрясений с $T = 5.06$ лет; 3 – прогноз следующего события; 4 – 67% доверительный интервал.

2003 и др.]. Надежность прогнозов повышается при использовании нескольких обоснованных методов.

Курило-Камчатская дуга и соседние Японская и Алеутская дуги образуют северо-западную часть Тихоокеанского сейсмического пояса, в которой сейсмичность достигает наиболее высокого уровня, существующего на Земле.

Сейсмичность, сеймотектоника, геодинамика, механизм сейсмической деятельности, ее свойства рассматриваются в большом числе работ. Отметим

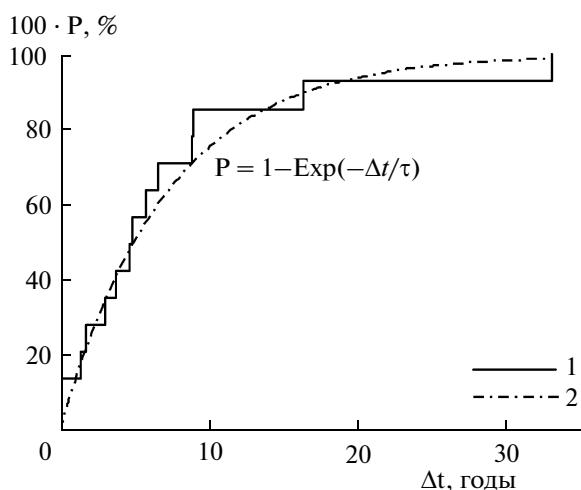


Рис. 9. Эмпирическое распределение интервалов времени Δt между сильнейшими ($M \geq 7.7$) землетрясениями с $N < 100$ км Курильской части Курило-Камчатской сейсмогенной зоны в 1900–2010 гг.: 1 – график кумулятивного эмпирического распределения интервалов времени Δt ; 2 – аппроксимация экспоненциальным распределением, $\tau = 7.2$ года.

только некоторые из числа последних таких исследований: [Ребецкий, 2007; Родкин, 2008]. В книге [Ребецкий, 2007] показана одинаковая ориентация поддвиговых напряжений под всей Курило-Камчатской дугой, что подтверждает представление об однородности этой структуры. В работе [Родкин, 2008] анализировалось пространственно-временное распределение интенсивности потока землетрясений в окрестности очагов сотен сильных землетрясений с $M \geq 7.2$. Показано, что в области, размеры которой вдвое больше области очага землетрясения, эта интенсивность повышена в течение 7000 сут. перед землетрясением и сильно возрастает в течение последних 100 сут. перед ним. Эти данные подтверждают построение сейсмических циклов параметров A_{10} и A_{11} для Курило-Камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$, в которых число землетрясений энергетических классов $K_S = 10$ и 11 значительно возрастает в обширной области подготовки таких землетрясений за 5–10 лет до них [Федотов, 2005; Федотов, Чернышев, 1987, 2002; Федотов и др., 2004, 2007, 2008₁ и др.].

С 80-х годов прошлого века и позднее учитывались данные о повышении сейсмической опасности сильных землетрясений в определенные фазы лунного цикла, период которого равен 18.6 года [Широков, 1978]. По новым данным [Широков, Серафимова, 2006] в ближайшем десятилетии существуют два интервала длиной 3.1 года каждый, которые опасны для г. Петропавловск-Камчатский: VI 2008–VII 2011 гг. и VIII 2014–XI 2017 гг. Вероятность сильных землетрясений в эти интервалы может быть приблизительно в 4 раза выше многолетней средней. Сделан вывод о том, что опасность в пер-

вом интервале относительно невелика, но существенно повышается во втором интервале [Шировков, Серафимова, 2006]. В работе [Гусев, 2008] рассматривалась 56-летняя цикличность сильных землетрясений на Камчатке. В ней на основании эмпирических тенденций получен иной вывод. Считается, что более опасен первый период, август 2008 – сентябрь 2011 гг., когда вероятность землетрясения силой 7 и более баллов в г. Петропавловске-Камчатском равна 0.39 ± 0.15 .

Существенно, что оценка оказалась очень близкой к оценке, данной по рассматриваемому методу для г. Петропавловск-Камчатский на IV 2008–III 2013 гг., по которой вероятность землетрясения силой 7–9 баллов в эти годы достигает 49.2% [Федотов и др., 2008₁].

Названная близкая оценка приведена в разделе 3.1. В нем на основе данных кумулятивных графиков сейсмической энергии и распределения интервалов времени между сильнейшими землетрясениями Курило-Камчатской дуги показано, что 2011–2012 гг. являются вероятным временем такого землетрясения на Камчатке.

Одним из апробированных методов долгосрочного сейсмического прогноза является метод М8, применяющийся для выделения пятилетних периодов повышенной вероятности (ППВ) землетрясений с магнитудой $M \geq 7.7$ (вероятность $P \approx 2/3$) во многих регионах мира [Кейлис-Борок, Кособоков, 1986; Кособоков, 2005].

На Камчатке метод М8 применялся в реальном времени с 1996 г. для прогноза периодов повышенной вероятности в перекрывающихся квадратах размером 660×660 км. Он полезен для уточнения ППВ в сейсмических брешах. Таким методом был сделан успешный прогноз Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8$ [Матвиенко, 1998].

Сейсмические процессы развиваются сложным образом в областях готовящихся сильных землетрясений в течение последних 5 лет сейсмического цикла. Наблюдаются кольцевая сейсмичность, сейсмические затишья, последующая форшоковая активизация и рои предварающих форшоков, взаимосвязь и миграция очагов больших землетрясений и др. [Mogi, 1985, 1990; Wiss, Habermann, 1988; Соболев, 1993, 1999, Соболев, Тюпкин, 1998; Соболев, Пономарев, 2003; Завьялов, Никитин, 1989; Салтыков, Кугаенко, 2000; Салтыков, Кравченко, 2009, 2010; Тихонов, 2006 и др.].

Одним из главных свойств сейсмического цикла, используемых в рассматриваемом методе долгосрочного сейсмического прогноза, является рост сейсмической активности A_{10} на заключительной III стадии сейсмического цикла в большой области – в очаге готовящегося сильного землетрясения и окружающей его части сейсмогенной зоны [Федотов, 2005; Федотов и др., 2004, 2007, 2008₂ и др.]. Это свойство было выявлено при изучении развития

сейсмичности перед многими курило-камчатскими землетрясениями с $M \geq 7.7$.

Важен вопрос о соответствии такого длительного роста сейсмической активности в сейсмических брешах другим прогностическим признакам. В данной работе приводятся лишь краткие сведения по этому вопросу.

Понятие “сейсмическое затишье”, его физическая природа, механизм образования и применение в сейсмических прогнозах рассматривалось в большом числе работ. Кроме работ о сейсмических процессах, которые были рассмотрены выше, отметим работу М.А. Садовского о природе явления [Садовский, 1999], работу [Рикитаке, 1979], еще раз [Mogi, 1985, 1990; Соболев, 1999], а также [Соболев, Пономарев, 2003; Родкин, 2008].

Как отмечалось в начале этого раздела, в работе [Родкин, 2008] показано, что сейсмичность в очагах готовящихся сильных землетрясений и прилегающей области, размеры которой вдвое больше размеров очага, является повышенной в течение 20 лет перед такими землетрясениями. В работах [Соболев, 1999, 2010 и др.] приводятся данные о том, что сейсмичность в очагах и большой области подготовки сильных землетрясений является повышенной в течение 5 и более лет до них. Такие данные подтверждают, то, что повышение A_{10} в области очагов курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в течение 5–10 и более лет перед ними в большинстве случаев является верным прогностическим параметром.

В то же время такие явления, как сейсмическое затишье, которое может быть в первой половине последнего пятилетия сейсмического цикла, и возникающие после него форшоковые активизации, должны учитываться при составлении среднесрочных и краткосрочных сейсмических прогнозов, которые даются для интервалов продолжительностью менее 5 лет.

Комплексный анализ сейсмичности Камчатки, при котором определяется и картируется ряд параметров сейсмичности: энергия землетрясений E , наклоны графиков повторяемости γ , сейсмическая активность A_{10} , кластеризация землетрясений, – дан в работе [Салтыков, Кравченко, 2009] и др. Эти данные используются при оценке сейсмической обстановки.

Успешно применяются методы кода-волн [Гусев, Лемзиков, 1984], RTL, КОЗ (Карта ожидаемых землетрясений) и другие методы среднесрочного сейсмического прогноза курило-камчатских землетрясений [Соболев, 1993, 1999, 2010; Соболев, Тюпкин, 1998; Завьялов, 2002, 2006; Тихонов, 2006; Салтыков, Кравченко, 2009 и др.]. Изложение и сопоставление этих результатов могут быть даны в отдельных работах.

Отдельной темой является также рассмотрение и обобщение результатов исследований по прогнозу

куруло-камчатских землетрясений, получающихся на основе других сейсмологических, геофизических, геологических, ионосферных, гидрологических и геохимических исследований.

Данные долгосрочных и среднесрочных сейсмических прогнозов для Курило-Камчатской дуги, которые были названы выше, сопоставляются и учитываются при оценке сейсмической обстановки. Это повышает надежность дающихся прогнозов. В частности, при обновлении долгосрочных сейсмических прогнозов на следующие 5 лет надо учитывать оценки изменений хода сейсмического процесса в последние годы, которые выявляются методами среднесрочного сейсмического прогноза.

Среди следующих задач и направлений развития рассматриваемого метода долгосрочного сейсмического прогноза остаются исследования закономерностей сейсмичности в области сильнейших землетрясений на заключительной, III стадии сейсмического цикла, уточнение свойств используемых и применение новых сейсмических параметров, совместное использование с другими методами прогноза, применение метода в других регионах со сходными сеймотектоническими условиями, а также важное дальнейшее практическое применение и использование данных долгосрочных сейсмических прогнозов [Федотов, 2005; Федотов и др., 2007, 2008₁, 2008₂; Fedotov et al., 2007, 2008 и др.].

Во “Введении” приведены краткие сведения о том, что данные долгосрочных сейсмических прогнозов, полученных по рассматриваемому методу, явились обоснованием для применения в 1986–2008 гг. заблаговременных правительственных мер по обеспечению сейсмобезопасности, проведению сейсмоусиления жилых домов, повышению устойчивости основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае и Сахалинской области. 30 июля 2009 г. Правительство РФ выделило большие средства на эти цели. Для ускорения этих неотложных ответственных работ 2 сентября 2010 г. было издано Распоряжение Правительства РФ, которым “Дальспецстрой” был определен исполнителем работ по реконструкции объектов, сейсмоусилению существующих зданий и строительству новых жилых домов в Камчатском крае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Заключении отмечается ряд результатов работы, и приводятся основные выводы.

1. Был успешным долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на предстоящее пятилетие, IX 2005–IX 2010 гг., составленный по апробированному методу, который основан на закономерностях размещения очагов сильнейших землетрясений (сейсмические бреши) и сейсмического цикла [Федотов, 1965, 1968, 2005 и

др.] и указывает наиболее вероятные места следующих сильнейших землетрясений.

Сильнейшие землетрясения этого времени, Средне-Курильские (Симуширские) землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$ и 13.I 2007 г., $M = 8.1$, произошли в предсказанной сейсмической бреши. По предшествовавшим прогнозам район Средних Курильских о-вов считался одним из двух наиболее вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ Курило-Камчатской дуги в это пятилетие. Оправдались также прогнозы сейсмической активности A_{10} и магнитуд землетрясений средней силы, ожидавшихся с вероятностью 0.8 для участков Курило-Камчатской дуги, а также прогноз последовательности афтершоков с $M \geq 6.0$ названных Средне-Курильских землетрясений, (см. раздел 1).

2. Дан долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на следующее пятилетие, IX 2010–VIII 2015 гг., составленный по тому же методу [Федотов, 1965, 1968, 2005 и др.], (см. раздел 2).

В этот период времени наиболее вероятным местом следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ Курило-Камчатской дуги остаются участки сейсмогенной зоны, расположенные в районе г. Петропавловск-Камчатский (см. рис. 3, участки 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б). Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в этих шести участках, которые могут иметь силу 7–9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, достигает 54% в период времени IX 2010–VIII 2015 гг. При этом вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$ в Авачинском заливе в участке 12б (см. рис. 3), наиболее близком к г. Петропавловск-Камчатский, равна 17.5%. Такое землетрясение может иметь силу 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский.

Вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в соседних пяти участках равна 36.5%. Эти землетрясения могут иметь силу 7 и 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский.

На ближайшие 5 лет вероятность 9-балльных сотрясений в г. Петропавловск-Камчатский, связанных с возможным сильнейшим землетрясением в ближней части Авачинского залива (участок 12б), превышает ее среднюю многолетнюю величину, равную 3.6–4.2%, в четыре с половиной раза.,

Другими опасными местами остаются сейсмические бреши, находящиеся в следующих участках: возле п-ова Немуро (участок 1, вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$ равна 6.5%), в проливе Буссоль (участок 6, вероятность 7.8%), в районе о-ва Онекотан (участки 8 и 9, вероятности 10.2 и 5.9%) и в Камчатском заливе (участок 15, вероятность 6.9%), см. рис. 3. В этих участках вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в 1.5–2.5 раза превышает среднюю.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в период времени IX 2010–VIII 2015 гг. ниже средней.

3. Дополнительные приближенные оценки были получены по данным о накоплении и сбрасывании сейсмической энергии в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне в 1900–2010 гг. Они показывают, что к началу периода IX 2010–VIII 2015 гг. основная часть сейсмической энергии накоплена в районе Камчатки, а 2011–2012 гг. являются здесь вероятным периодом следующего землетрясения с $M = 7.7–8.0$, (см. раздел 3). Ранее при изучении лунной цикличности сильных землетрясений Камчатки предсказывалось, что повторяемость сильных землетрясений у берегов Камчатки в VIII 2008–X 2011 гг. будет повышена примерно в четыре раза относительно многолетней средней [Гусев, 2008 и др.]. Оценки на ближайшие годы могут быть уточнены методами среднесрочного сейсмического прогноза.

4. Среди задач дальнейшего развития метода долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги и сходных структур важны исследования свойств и параметров заключительной III стадии сейсмического цикла, сопоставление и сочетание с данными других методов долгосрочного и среднесрочного сейсмического прогноза, применение в других регионах мира.

5. Научно-исследовательские и научно-прикладные работы по рассматриваемому методу долгосрочного сейсмического прогноза имеют государственную важность. На основании их данных в 1986–2009 гг. принято более десяти Постановлений и Решений Правительства СССР и РФ, Поручений Президентов РФ о подготовке Камчатского края и Сахалинской области к сильным землетрясениям [Федотов, 2005 и др.], (см. “Введение”).

30 июля 2009 г. Правительство РФ выделило значительные средства Камчатскому краю и Сахалинской области на повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в 2009–2013 гг.

2 сентября 2010 г. Правительство РФ для ускорения этих работ назначило “Дальспецстрой” их исполнителем в Камчатском крае.

Необходимо должным образом продолжать и развивать ведущиеся исследования и работы по долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги.

В последние годы меры по сейсмоусилению и сейсмоукреплению в Камчатском крае принимались по заданиям Президента РФ Д.А. Медведева и Председателя Правительства РФ В.В. Путина при деятельном участии губернатора Камчатского края А.А. Кузьмицкого и министра строительства Правительства Камчатского края С.Г. Гамова.

Президент РАН академик Ю.С. Осипов, вице-президент РАН академик Н.П. Лавров, председатель ДВО РАН академик В.И. Сергиенко и академик-секретарь ОНЗ РАН академик А.О. Глико неизменно поддерживали исследования и выдвигали необходимые предложения.

Исследования велись по программе № 16 фундаментальных исследований Президиума РАН, проект ДВО РАН № 09-1-П16-06 “Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: продолжение прогноза, обоснование мер по повышению сейсмостойкости, развитие метода и применение в других регионах мира”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гусев А.А. О реальности 56-летнего цикла и повышенной вероятности сильных землетрясений в Петропавловске-Камчатском в 2008–2011 гг. согласно лунной цикличности // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 55–65.
- Гусев А.А., Лемзиков В.К. Аномалии характеристик кода-волн слабых землетрясений перед тремя сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 76–90.
- Завьялов А.Д. Анализ тестирования прогностического алгоритма КОЗ с 1985 по 2000 гг. в различных сейсмоактивных районах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 4. С. 16–30.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука, 2006. 225 с.
- Завьялов А.Д., Никитин Ю.В. Процесс локализации сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 83–89.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышенной вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С. 48–58.
- Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений, основы, реализация, перспективы // Сер. Вычислительная сейсмология. 2005. Вып. 36. 180 с.
- Матвиенко Ю.Д. Применение метода M8 на Камчатке: успешный заблаговременный прогноз землетрясения 5 декабря 1997 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 27–36.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. Ред. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ПКЦ Академкнига, 2007. 408 с.
- Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 390 с.
- Родкин М.В. Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
- Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 1999. 335 с.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Опыт комплексного анализа сейсмичности Камчатки 2005–2007 гг. на основе ре-

- гионального каталога // Вулканология и сейсмология. 2009. № 4. С. 53–63.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М.* Параметры сейсмичности Камчатки в 2007–2008 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 86–90.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А.* Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 57–65.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 312 с.
- Соболев Г.А.* Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 63–72.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Стадии подготовки, сейсмические предвестники и прогноз землетрясений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 17–26.
- Тараканов Р.З.* Уроки Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M_W = 8.3$) и 13 января 2007 г. ($M_W = 8.1$) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 41–54.
- Тихонов И.Н.* Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий. Владивосток, Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 214 с.
- Федотов С.А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. 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.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги и обеспечение мер по сейсмобезопасности // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Тр. региональной научно-технической конференции. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008₁. С. 21–27.
- 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. 2008₂. № 6. С. 3–23.
- 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: достоверность в 1986–2000 гг., развитие метода и прогноз на 2001–2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 3–24.
- 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.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 29–60.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В., Потапова О.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз и развитие очага Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. // Федеральная служба сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информ. аналит. бюл. Экстренный выпуск. М.: ФССНПЗ, 1994. С. 56–67.
- Широков В.А.* Влияние девятнадцатилетнего лунного прилива на возникновение больших извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 164–170.
- Широков В.А., Серафимова Ю.К.* О связи 19-летнего лунного цикла с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихого океана // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 120–133.
- Fedotov S.A., Chernyshev S.D.* Twenty Years of Long-Term Seismic Forecasting for the Kuril-Kamchatka Arc: Reliability for 1981–1985 and for the Whole Period 1965–1985 and a Forecast for 1986–1990 // *Volcanology and Seismology*. 1990. V. 9. № 6. P. 956–981 (Translation of the Russian journal *Vulkanologia i Seismologia*. 1987. № 6. P. 93–109).
- Fedotov S.F., Potapova O.V., Chernysheva G.V., Shumilina L.S.* Earthquake Hazard from $M \geq 6$ Aftershocks of Great ($M \geq 7.7$) Earthquakes in the Kuril-Kamchatka and Japan Island Arcs // *Volcanology and Seismology*. 1998. V. 20. № 1. P. 65–72 (Translation of the Russian journal *Vulkanologia i Seismologia*. 1998. № 1. P. 54–61).
- Fedotov S.A., Solomatina A.V., Chernyshev S.D.* A long-term Earthquake Forecast for the Kuril-Kamchatka Island Arc for the Period 2006–2011 and Successful Forecast of the $M_S = 8.2$ Middle Kuril-Kamchatka Earthquake of November 15, 2006 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2007. V. 1. № 3. P. 143–163 (Original Russian text is published in *Vulkanologia i Seismologia*. 2007. № 3. P. 3–25).

Fedotov S.A., Solomatin A.V., Chernyshev S.D. Aftershok and the Rupture Zone of the $M_S = 8.2$, November 15, 2006 Middle Kuril-Kamchatka Earthquake and Long-Term Earthquake Forecast for the Kuril-Kamchatka Arc for the Period April 2008 to March 2013 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2008. V. 2. № 6. P. 375–394 (Original Russian text is published in *Vulkanologia i Seismologia*. 2008. № 6. P. 3–23).

Fedotov S.A., Solomatin A.V., Chernyshev S.D. Long-Term Earthquake Forecast for the Kuril-Kamchatka Arc for 2009–2014 // 6th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (JKASP-2009), June 22–26, 2009. Scientific program & abstracts. Geophysical Institute University of Alaska, Fairbanks, Alaska. P. 126–127.

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

Mogi K. Seismicity before and after large shallow earthquakes around the Japanese islands. // *Tectonophysics*. 1990. V. 175. P. 1–33.

Nishenko S.P. Circum-Pacific seismic potential, 1989-1999 // *PAGEOPH*. 1991. V. 135. № 2/3. P. 169–260.

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.

Wiss M., Habermann K.E. Precursory quiescence // *PAGEOPH*. 1988. V. 126. P. 319–332.

A Long-Term Earthquake Forecast for the Kuril–Kamchatka Arc for the Period from September 2010 to August 2015 and the Reliability of Previous Forecasts, as well as their Applications

S. A. Fedotov^{1,2}, A. V. Solomatin¹, and S. D. Chernyshev¹

¹ *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

² *Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia*

Abstract—We describe results from the ongoing 2008–2010 work on long-term earthquake prediction for the Kuril–Kamchatka arc based on the patterns of seismic gaps and the seismic cycle. We provide a forecast for the next 5 years, September 2010 to August 2015, specified for all segments of the earthquake-generating Kuril–Kamchatka arc zone. For 20 segments we predict the phases of the seismic cycle, the normalized rate of small earthquakes (A_{10}), the magnitudes of moderate earthquakes to be expected with probabilities of 0.8, 0.5, and 0.15, the maximum possible magnitudes, and the probabilities of great ($M \geq 7.7$) earthquakes. It is shown that the forecast given for the previous 5 years, from September 2005 to September 2010, was found to be accurate. We report the measures that were taken for seismic safety and retrofitting based on these forecasts.