

УДК 550.34

## ОПЫТ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ( $M \geq 6.0$ ) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ В 1998–2011 гг. ПО МАТЕРИАЛАМ КФ РЭС

© 2013 г. В. Н. Чебров, В. А. Салтыков, Ю. К. Серафимова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,  
e-mail: chebr@emsd.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2012 г.

Статья посвящена деятельности Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) на протяжении 14 лет. Приводятся краткие сведения об организации работы КФ РЭС, используемые при экспертной оценке методики прогнозирования землетрясений, прогнозы и предвестники камчатских землетрясений с  $M \geq 6.0$  в 1998–2011 гг. Даются результаты оценки эффективности прогнозирования по отдельным методикам.

DOI: 10.7868/S0203030613010033

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с картой общего сейсмического районирования территории России ОСР-97 на Камчатке сильные землетрясения с  $M > 7.0$  происходят в среднем один раз в 3–4 года; с  $M > 8.0$  – один раз в 50–60 лет. На территории г. Петропавловска-Камчатского эти землетрясения вызывают сотрясения 7 баллов в среднем один раз в 30–40 лет, 8 баллов – 90–110 лет, 9 баллов – 500–700 лет [Комплект ..., 1999]. Безопасность населения и снижение экономических потерь от сильных землетрясений определяются знанием реальной сейсмической опасности, сейсмостойкостью зданий и сооружений, готовностью служб и органов власти к стихийному бедствию. Существенное значение для уменьшения последствий сильных землетрясений имеет прогноз времени, места и энергии сильных землетрясений. Это дает возможность проведения превентивных мероприятий.

Возможность прогноза времени, места и энергии сильных землетрясений определяются знанием физики очага и адекватностью моделей подготовки и реализации сильных землетрясений, изученностью пространственно-временных закономерностей сейсмичности конкретного региона и ее отражения в параметрах геофизических полей (сейсмометрические, гравиметрические, магнитометрические, геодезические и др. данные), в геохимических и гидрогеологических характеристиках района и т. д. В зависимости от времени упреждения различают три вида прогнозов: долгосрочный, среднесрочный, краткосрочный. Долгосрочный прогноз

(время упреждения более года) – по существу попытка локализации оценок общего сейсмического районирования в пространстве и времени.

Среднесрочный прогноз сильных землетрясений (время упреждения от месяца до года) основывается на закономерностях сейсмического режима конкретного региона и на отражении процессов подготовки этих землетрясений в параметрах геофизических полей. Методы среднесрочного и долгосрочного прогнозов в России и мире наиболее разработаны и могут лежать в основе принятия решения о проведении превентивных мероприятий. Краткосрочный прогноз сильных землетрясений (время упреждения от часов до нескольких недель) на уровне имеющихся знаний является нерешенной проблемой до настоящего момента.

Задача своевременной и надежной оценки текущей сейсмической опасности для г. Петропавловска-Камчатского крайне важна. В настоящее время невозможно говорить о надежном и точном краткосрочном прогнозе времени, места и энергии сильных землетрясений. Однако имеются многие успехи (в том числе и на Камчатке) в методиках долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных оценок сейсмической опасности [Чебров и др., 2009].

В статье приведены систематизированные фактические материалы о выделении предвестников землетрясений с  $M \geq 6.0$  на Камчатке по более чем двадцати методикам среднесрочного и краткосрочного прогноза на основе обработки, анализа и интерпретации данных комплексных сейсмологических, геофизических, геохимических, геодезических и др. наблюдений.

Современная система комплексного мониторинга геодинамических процессов в сочетании с высокой повторяемостью природных катастроф на Камчатке дают уникальные возможности для проведения здесь исследований в области прогноза сильных землетрясений.

### ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ

Для оперативной оценки сейсмической опасности, прогноза землетрясений и извержений вулканов, возможных последствий их воздействий в 1998 г. было учреждено Камчатское отделение Федерального центра прогнозирования землетрясений (КамО ФЦПЗ) как структурное подразделение Геофизической службы РАН в рамках целевой программы “Развитие Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений на 1995–2000 гг.”, которое существовало и функционировало до февраля 2006 г. В соответствии с Положением о Российском экспертном совете по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, утвержденным Совместным решением Российской Академии наук и МЧС России от 15 марта 2003 г., предусмотрено создание Камчатского филиала РЭС на базе Камчатского филиала Геофизической службы РАН и Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН. В феврале 2006 г. КамО ФЦПЗ было реорганизовано и продолжает свою работу как Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС).

Основная функция КФ РЭС – оперативная оценка сейсмической опасности, прогноз землетрясений и извержений вулканов, возможных последствий их воздействий. На этом этапе мониторинга производится комплексирование более 20 методик прогнозирования [Гордеев и др., 2004, 2006а; Серафимова, 2010; Чебров, 2008; Чебров и др., 2006, 2009].

В работе КФ РЭС регулярно принимали и принимают участие следующие научно-исследовательские организации:

- Камчатский филиал Геофизической службы (КФ ГС) РАН (до 2005 г. Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия (КОМСП) ГС РАН);

- Институт вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН (до 2004 г. Институт вулканологии (ИВ) ДВО РАН и Институт вулканической геологии и геохимии (ИВГиГ) ДВО РАН);

- Институт космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН;

- ОАО “Камчатгеология”;

- Институт физики Земли (ИФЗ) РАН, г. Москва;

- Физико-технический институт (ФТИ) РАН, г. Санкт-Петербург;

- Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга (КамГУ) (до 2005 г. Камчатский государственный педагогический университет (КГПУ)).

В 2006 г. в состав КФ РЭС включен представитель Центра мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций ГУ МЧС по Камчатскому краю.

Заседания КФ РЭС проводятся еженедельно. При нештатной обстановке (усиление сейсмической и вулканической активности или прогнозы сильных землетрясений от других организаций и физических лиц) заседания проводятся так часто, как это необходимо. Заключения о сейсмической и вулканической опасности в Камчатском крае передаются в РЭС, Координационный прогностический центр (КПЦ) ИФЗ РАН, краевую и городскую администрации, Главное Управление МЧС России по Камчатскому краю, Геофизическую службу РАН, центр “Антистихия” МЧС РФ, управление ФСБ по Камчатскому краю, командующему войсками и силами на северо-востоке РФ. Передача заключений в средства массовой информации осуществляется через пресс-центр ГУ МЧС по Камчатскому краю. На рис. 1 представлена схема организации работ по оценке сейсмической и вулканической активности Камчатки.

При еженедельной оценке сейсмической опасности рассматриваются заключения о сейсмической обстановке по данным наблюдений за предвестниками сильных землетрясений, которые можно разделить на несколько групп в соответствии с природой используемых полей: сейсмологические, геофизические, геохимические, геодезические. Большинство методик подробно рассмотрено в [Чебров и др., 2011], там же приведены примеры их применения. В настоящей статье приводится только перечень рассматриваемых методик с указанием литературных источников. В скобках указаны авторы заключений о сейсмической опасности и организации, в которых выполняются исследования, в кавычках даны сокращенные названия методик, используемые далее в тексте.

#### Сейсмологические:

- вариации крутизны спада огибающей коды слабых местных землетрясений (А.А. Гусев, И.Р. Абубакиров, КФ ГС РАН, ИВиС ДВО РАН) [Абубакиров и др., 1998; Gusev, 1997];

- алгоритм М6 – комплексное использование большой совокупности различных сейсмологических и космофизических параметров (“Алгоритм М6”) (В.А. Широков, КФ ГС РАН) [Широков, 2001];

- обнаружение сейсмических затиший по методикам RTL и Z-тест (“RTL” и “Z-тест” соответ-

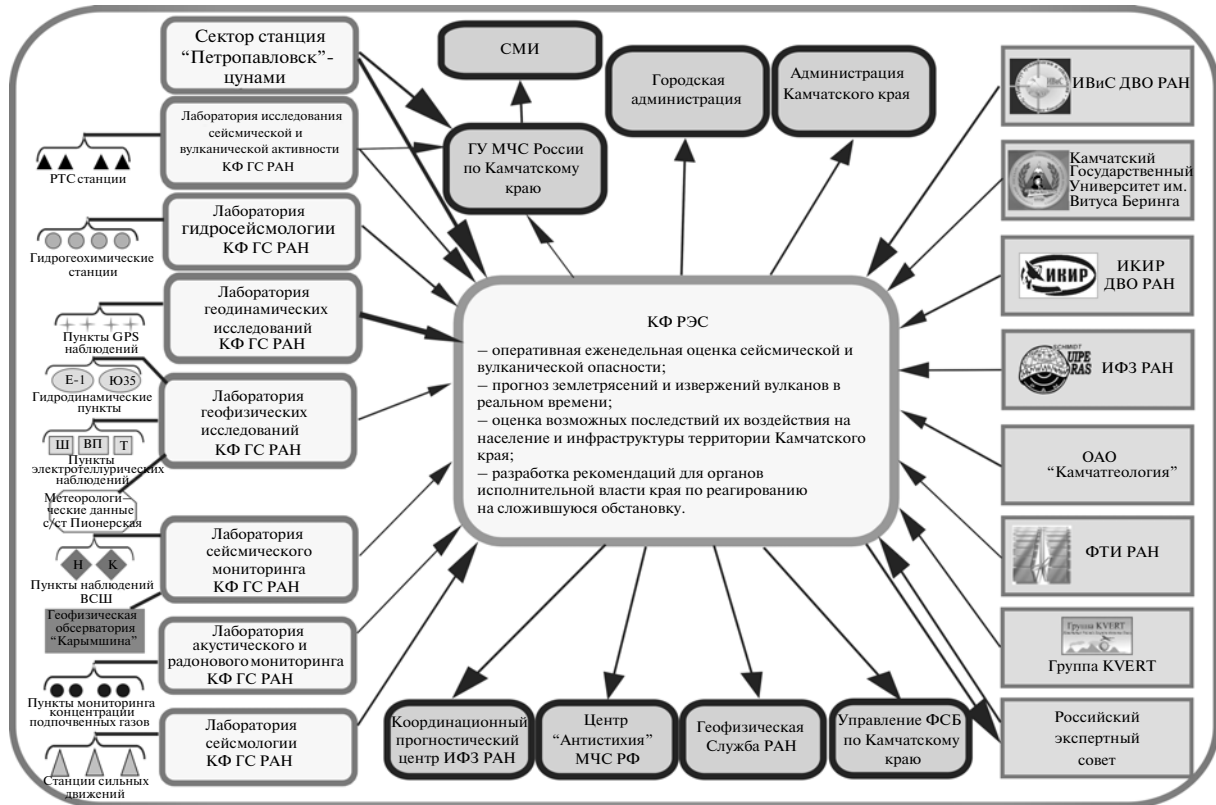


Рис. 1. Схема организации работ по оценке сейсмической и вулканической активности Камчатки [Чебров, 2008].

ственно) (В.А. Салтыков, Н.М. Кравченко, КФ ГС РАН) [Кравченко, 2005; Салтыков, Кравченко, 2004; Салтыков, Куганко, 2000; Соболев, Тюпкин, 1996; Wyss, Habermann, 1988];

- обнаружение зон сейсмической активизации по методике  $\Delta S$  и кластеризации землетрясений (В.А. Салтыков, КФ ГС РАН) [Соболев, Тюпкин, 1996];

- мониторинг пространственного распределения наклона графика повторяемости землетрясений  $\gamma$  (В.А. Салтыков, КФ ГС РАН) [Соболев, Пономарев, 2003];

- параметр  $\tau$  (вариации отношения скоростей сейсмических волн  $V_P/V_S$ ) (“Параметр  $\tau$  ( $V_P/V_S$ )”) (Л.Б. Славина, ИФЗ РАН) [Славина и др., 2004];

- мониторинг сдвиговых напряжений по азимутальным вариациям отношения скоростей сейсмических волн (“Данные поля напряжений”) (И.А. Гарагаш, ИФЗ РАН) [Гарагаш, 1998];

- прогноз магнитуды и времени землетрясения методом “Критическое ускорение сейсмичности (КУС)” (Г.А. Соболев, ИФЗ РАН) [Соболев, Пономарев, 2003];

- изменения средних значений временных интервалов между сейсмическими событиями и их коэффициент вариации (“Вариации временных интервалов”) (Н.Г. Томилин, ФТИ РАН) [Томилин и др., 2005];

- методика ГЛОБАС, ориентированная на оценку развития мировой сейсмичности (В.А. Широков, КФ ГС РАН) [Широков, 2010].

#### Геофизические:

- вариации параметров высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), связанные с изменением приливного отклика чувствительности среды перед сильными землетрясениями (“Методика ВСШ”) (В.А. Салтыков, КФ ГС РАН) [Рыкунов и др., 1998; Салтыков и др., 2008];

- скважинные гидрогеодинамические (вариации уровня воды, атмосферного давления) (“Скважинные гидрогеодинамические наблюдения”) (Г.Н. Копылова, КФ ГС РАН) [Копылова, 2001, 2008; Копылова и др., 2011];

- гидрогеодеформационный (ГГД) мониторинг (вариации уровня воды в скважинах, атмосферного давления) (“ГГД-мониторинг”) (Н.Н. Смолина, ОАО “Камчатгеология”) [Вартанян, Куликов, 1982];

- параметры атмосферно-ионосферных полей (“Ионосферное зондирование”, “ОНЧ-излучение”, “Вариации ГМП, АЭП приземного слоя атмосферы”) (В.В. Богданов, Г.И. Дружин, С.Э. Смирнов, ИКИР ДВО РАН) [Богданов и др., 2004];

- вариации электромагнитного излучения в полосе частот 9–17 кГц (“Регистрация ЭМИ”)

(А.Н. Кролевец, КамГУ) [Кролевец, Павлюков, 2000];

– вариации электротеллурического поля (Ю.Ф. Мороз, ИВиС ДВО РАН) [Мороз и др., 2004];

– скважинные геоакустические измерения, измерения электрической составляющей электромагнитного поля Земли в СНЧ-диапазоне частот с помощью подземной антенны, мониторинг изменений плотности воды в скважине (“Скважинные геоакустические наблюдения”) (В.А. Гаврилов, ИВиС ДВО РАН) [Гаврилов и др., 2006].

#### Геохимические:

– вариации химического состава воды в скважинах и источниках (“Гидрогеохимический мониторинг”) (Г.В. Рябинин, КФ ГС РАН) [Хаткевич, Рябинин, 2006];

– измерение объемной активности радона  $^{222}\text{Rn}$  и водорода в подпочвенном газе (“Измерение ОА  $^{222}\text{Rn}$ ”) – анализ как индивидуально, так и в комплексе с анализом каталогов землетрясений (“Методика РВС” – радон-водород-сейсмичность) (П.П. Фирстов, КФ ГС РАН) [Фирстов и др., 2006].

#### Геологические:

– GPS-наблюдения (В.А. Полетаев, КФ ГС РАН) [Левин и др., 2006].

По Положению о КФ РЭС возможность подать прогноз предоставляется всем желающим, поэтому рассматриваются также прогнозы и оценки, подаваемые другими организациями и частными лицами. В частности, регулярно поступают заключения А.Я. Лездиньша, использующего астрофизический подход к проблеме прогноза сейсмических и вулканических явлений (“Астрофизический”). Кроме того, рассматривались прогнозные заключения В.Г. Сибгатулина из НП “Экологический центр рационального освоения природных ресурсов” (НП “ЭЦ РОПР”), г. Красноярск, применяющего при составлении прогнозных оценок “Энтропийную модель сейсмического процесса”; Л.Н. Доды, специалиста из Научного Центра оперативного мониторинга Земли (“НЦ ОМЗ”) и др.

С 2009 г. текущий уровень сейсмичности в Камчатском крае оценивается по шкале “СОУС’09” [Салтыков, 2011]. Для характеристики уровня сейсмичности применена эмпирическая функция распределения суммарной выделившейся сейсмической энергии  $E$ :  $F(x) = P(\lg E \leq x)$ . Используя набор опорных квантилей  $K(0.995)$ ,  $K(0.975)$ ,  $K(0.85)$ ,  $K(0.15)$ ,  $K(0.025)$ ,  $K(0.005)$ , содана шкала уровней сейсмичности:

- экстремально высокий –  $K(0.995) < \lg E$ ,
- высокий –  $K(0.975) < \lg E < K(0.995)$ ,
- фоновый –  $K(0.025) < \lg E < K(0.975)$ ,

– низкий –  $K(0.005) < \lg E < K(0.025)$ ,

– экстремально низкий –  $\lg E < K(0.005)$ .

Согласно такой градации в 95% случаев сейсмичность находится на фоновом уровне. При необходимости его можно разбить на три подуровня:

– фоновый (пониженный) –  $K(0.025) < \lg E < K(0.15)$ ,

– фоновый (средний) –  $K(0.15) < \lg E < K(0.85)$ ,

– фоновый (повышенный) –  $K(0.85) < \lg E < K(0.975)$ .

При оценке вулканической обстановки используются заключения KVERT – (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team), а также материалы о сейсмической активности вулканов, полученные в КФ ГС РАН [Гирина, 2008; Кирьянов и др., 2001; Сенюков, 2006].

## РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОГНОЗЫ И ПРЕДВЕСТНИКИ

В 1998–2011 гг. в Камчатском регионе произошло 26 землетрясений с магнитудой  $M \geq 6.0$ , большинство из которых предварялись предвестниками. Даты и магнитуды  $M_w$  ([http://wwwneis.cr.usgs.gov/neis/epic/epic\\_rect.html](http://wwwneis.cr.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html)) этих землетрясений представлены в таблице 1, а положение эпицентров на рисунке 2.

В таблице 1 также приводятся методики, по которым были даны прогнозы, впоследствии реализовавшиеся, или выявлены предвестники – как в реальном времени, так и ретроспективно для каждого землетрясения.

Под оправдавшимся прогнозом (см. табл. 1) подразумевается данное заблаговременно предупреждение о землетрясении, которое соответствует реальному по времени, положению, энергии. В случае несоответствия одного из этих параметров реальному предупреждение квалифицируется как “Предвестник, выявленный в режиме реального времени”. Если предвестник обнаружен (либо сообщение о нем представлено в КФ РЭС) после сильного землетрясения, то данная ситуация квалифицируется как “Предвестник, выявленный ретроспективно” (см. табл. 1).

На рис. 2 выделены две зоны – К и А. Зона К приурочена к восточному побережью Камчатки. В этой зоне для 17 землетрясений из 18, т.е. для 94% событий, были даны оправдавшиеся прогнозы либо выявлены предвестники в реальном времени. В 16 случаях число методик варьирует от двух до семи, в одном случае прогноз дан по одной методике (см. табл. 1, № 18). Для 12 землетрясений из 18, т.е. для 67% событий, были сделаны оправдавшиеся прогнозы. Следует отметить, что землетрясение № 17, для которого не были выявлены предвестники, не соответствует сейсмоак-

**Таблица 1.** Методики, по которым выявлены предвестники перед сильными ( $M \geq 6.0$ ) камчатскими землетрясениями 1998–2011 гг

№	Дата ггггммдд, $M_w$	Прогноз	Предвестник, выявленный в реальном времени	Предвестник, выявлен- ный ретроспективно
1	2	3	4	5
1	19980601, $M_w = 6.9$	1. Гидрогеохимический мониторинг		1. Методика ВСШ 2. Ионосферное зондирование 3. ОНЧ-излучение
2	19990308, $M_w = 7.0$	1. Регистрация ЭМИ	1. Гидрогеохимический мониторинг 2. Данные поля напряжений 3. ОНЧ-излучение	1. ОНЧ-излучение 2. RTL
3	19990918, $M_w = 6.0$	1. Методика ВСШ 2. ОНЧ-излучение	1. Гидрогеохимический мониторинг 2. Вариации ГМП, АЭП приземного слоя атмосферы	
4	19990928, $M = 6.2$			
5	19991126, $M_w = 6.0$			
6	20010802, $M_w = 6.3$			
7	20011008, $M_w = 6.5$	1. Параметр $\tau (V_P/V_S)$	1. Вариации ГМП, АЭП приземного слоя атмосферы 2. Регистрация ЭМИ	1. Гидрогеохимический мониторинг 2. Методика ВСШ 3. Методика РВС 4. RTL
8	20021016, $M_w = 6.2$	1. ОНЧ-излучение 2. Комплексное заключение ИКИР	1. Вариации ГМП, АЭП приземного слоя атмосферы 2. Методика РВС 3. Параметр $\tau (V_P/V_S)$ 4. Измерение ОА $^{222}\text{Rn}$ 5. Ионосферные наблюдения	1. ВСШ
9	20030315, $M_w = 6.1$	1. Вариации ГМП, АЭП приземного слоя атмосферы 2. Параметр $\tau (V_P/V_S)$	1. Методика ВСШ 2. Астрофизический	1. ГГД-мониторинг
10	20030616, $M_w = 6.9$	1. Астрофизический	1. Методика ВСШ	
11	20031205, $M_w = 6.7$		1. Параметр $\tau (V_P/V_S)$ 2. Измерение ОА $^{222}\text{Rn}$	
12	20040414, $M_w = 6.2$	1. Астрофизический	1. ОНЧ-излучение 2. Комплексное заключение ИКИР	
13	20040610, $M_w = 6.9$		1. Методика ВСШ 2. Параметр $\tau (V_P/V_S)$ 3. Скважинные гидрогеодинамические 4. Алгоритм М6 (среднесрочная оценка)	
14	20060412, $M_w = 6.0$	1. Скважинные геоакустические 2. Вариации временных интервалов	1. НЦ ОМЗ	

Таблица 1. (Окончание)

№	Дата гггг-ммдд, $M_w$	Прогноз	Предвестник, выявленный в реальном времени	Предвестник, выявленный ретроспективно
1	2	3	4	5
15	20060522, $m_b = 6.2$		1. Скважинные геоакустические 2. Параметр $\tau (V_p/V_s)$ 3. Астрофизический 4. Данные поля напряжений	1. Методика ВСШ
16	20060817 $m_b = 6.1$	1. Астрофизический 2. Вариации временных интервалов		
17	20060820 $M_w = 6.0$			
18	20060824 $M_w = 6.5$	1. Методика ВСШ		
19	20070530, $m_b = 6.4$	1. Z-тест	1. Методика ВСШ 2. Параметр $\tau (V_p/V_s)$ 3. НЦ ОМЗ 4. Астрофизический	
20	20080705, $M_w = 7.7$			
21	20080724, $M_w = 6.2$		1. Z-тест 2. Энтропийная модель сейсмического процесса	1. Методика ВСШ
22	20081124, $M_w = 7.3$	1. НЦ ОМЗ	1. Параметр $\tau (V_p/V_s)$	
23	20090421, $M_w = 6.2$		1. Методика ВСШ 2. Методика ГЛОБАС	
24	20091210, $M_w = 6.3$		1. Параметр $\tau (V_p/V_s)$	
25	20100730, $M_w = 6.3$		1. Методика ВСШ 2. Вариации временных интервалов 3. Энтропийная модель сейсмического процесса 4. ГГД-мониторинг 5. Z-тест	1. Скважинные гидрогеодинамические
26	20110220, $M_w = 6.1$	1. Z-тест 2. Параметр $\tau (V_p/V_s)$	1. RTL 2. СОУС'09	

тивной области Камчатки (см. рис. 2, пунктирная линия).

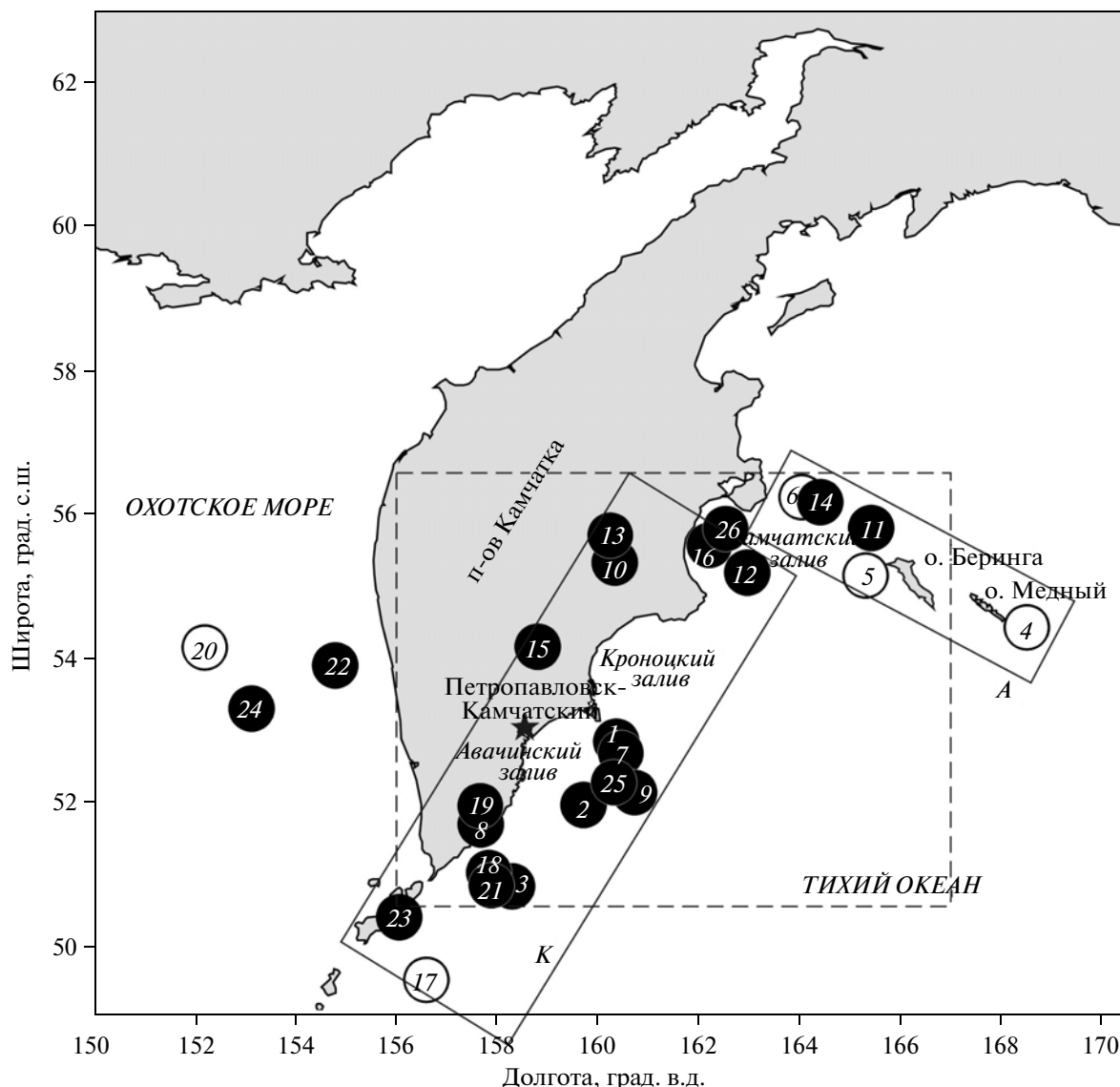
В зоне А, ориентированной вдоль направления структур Алеутской дуги, включая Командорские острова, где наблюдательные сети, кроме сейсмологической и GPS, либо отсутствуют, либо их уровень существенно ниже, чем в районе Петропавловского геодинамического полигона [Гордеев и др., 2006б], для двух из пяти событий были выявлены предвестники в реальном времени, либо даны прогнозы (40%).

Таким образом, максимальная эффективность использования методик прогноза в реальном времени соответствует наиболее опасному участку восточного побережья Камчатки, для которого в 67%

были сделаны оправдавшиеся прогнозы землетрясений, причем в 89% случаев события ожидалось по двум–семи методикам. К сожалению, все еще остается высоким процент ложных тревог.

#### РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗОВ И ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Прежде чем рассматривать оценки успешности прогностических методик, следует определиться с терминологией. Успешным прогноз считается только в том случае, если землетрясение произошло строго в указанных пространственно-временных и энергетических рамках. На этот ас-



**Рис. 2.** Карта эпицентров сильных камчатских землетрясений с  $M \geq 6.0$  в 1998–2011 гг. (нумерация согласно табл. 1). Черными кружками отмечены землетрясения, перед которыми выявлены предвестники в реальном времени, белыми кружками – землетрясения, перед которыми предвестники не выявлены. Пунктирной линией показан район с координатами ( $\varphi = 50.5\text{--}56.5\text{ N}$ ,  $\lambda = 156\text{--}167\text{ E}$ ), соответствующий сейсмоактивной области Камчатки. Тонкими сплошными линиями показаны зоны К и А, пояснения в тексте.

пект обращается особое внимание, так как не существует “частично оправдавшихся” прогнозов. Прогноз может либо оправдаться, либо не оправдаться. Если землетрясение произошло с отклонением от какого-либо из параметров (энергия, время, местоположение), в этом случае предлагается констатировать факт своевременного выявления предвестника, который, к сожалению, был проинтерпретирован авторами неправильно, то есть оценки или времени, или места, или энергии ожидаемого землетрясения сделаны неверно. Тем не менее, такой предвестник существует, и этот факт нельзя не учитывать. Кроме этого отдельные предвестники были обнаружены уже после землетрясения. Причины такой временной задержки могут

быть различны (начиная с несвоевременно проведенного анализа, недоработки критериев выделения аномалий и т.д.). Но даже если с практической стороны такие предвестники не представляют интереса, то научные аспекты их поиска сомнения не вызывают. Однако, целью данной работы является оценка эффективности именно прогнозирования землетрясений (то есть технологического процесса), а не выявления предвестников этих землетрясений (что является фундаментальной проблемой).

Оценка эффективности прогнозов, подаваемых по различным методикам, проведена исключительно формально, то есть: 1) по единой методике; 2) не обращая внимания на физическую

Таблица 2. Эффективность  $J$  прогнозов землетрясений

№	Методика	Автор, организация	Эффективность, $J$
1	Комплексное заключение ИКИР ДВО РАН	ИКИР ДВО РАН	1.0 (1999–2009 гг.)
2	ОНЧ-излучение	Дружин Г.И., ИКИР ДВО РАН	1.7 (1998–2009 гг.)
3	Вариации ГМП, АЭП приземного слоя атмосферы	Смирнов С.Э., ИКИР ДВО РАН	1.4 (1998–2009 гг.)
4	Вертикальное зондирование ионосферы	Богданов В.В., ИКИР ДВО РАН	0.0 (1998–2009 гг.)
5	Скважинные геоакустические наблюдения	Гаврилов В.А., ИВиС ДВО РАН	1.0 (2003–2008 гг.)
6	ВСШ	Салтыков В.А., КФ ГС РАН	0.8 (1998–2005 гг.), 1.3 (2006–2009 гг.)
7	Скважинные гидрогеодинамические наблюдения	Копылова Г.Н., КФ ГС РАН	1.1 (2003–2008 гг.)
8	ГГД-мониторинг	Смолина Н.Н., ОАО “Камчатгеология”	1.1 (2003–2009 гг.)
9	Астрофизический	Лездиньш А.Я. частное лицо	1.7 (2001–2009 гг.)
10	Алгоритм Мб	Широков В.А., ИВиС ДВО РАН, КФ ГС РАН	0.6 (1998–2009 гг.)
11	РВС	Широков В.А., Фирстов П.П., ИВГиГ ДВО РАН	1.0 (2000–2002 гг.)
12	Энтропийная модель сейсмического процесса	Сигбатулин В.Г., ЭЦ “РОПР” (Красноярск)	0.0 (2005–2008 гг.)
13	Измерение ОА $^{222}\text{Rn}$	Фирстов П.П., ИВиС ДВО РАН, КФ ГС РАН	1.1 (1998–2009 гг.)

обоснованность используемого подхода к прогнозированию; 3) считая успешными прогнозами только оправдавшиеся по трем параметрам (время-место-сила). При таком подходе оценивается именно технология прогнозирования в конкретных камчатских условиях.

За основу был взят подход оценки эффективности прогноза по [Гусев, 1974]. Если по конкретному методу прогноз выдается для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона, то эффективность данного метода  $J$  определяется по формуле

$$J = N_+ \cdot T / (N \cdot T_{\text{alarm}}),$$

где  $N_+$  – количество “ожидаемых” землетрясений, то есть соответствующих успешному прогнозу,  $N$  – общее количество произошедших землетрясений с параметрами (местоположение-энергия), соответствующими прогнозу, то есть землетрясений, которые могли бы предсказываться,  $T_{\text{alarm}}$  – общее время тревоги, то есть суммарная длительность всех прогнозов,  $T$  – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу.

В этом случае знаменатель дроби отражает среднее число возникновения землетрясений за время  $T_{\text{alarm}}$  в случае отсутствия связи прогнозов с

землетрясениями. Соответственно, эффективность  $J$  показывает, во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число попавших в тревожное время случайным образом. Очевидно, что при случайном угадывании эффективность  $J$  равна 1.

Но в нашем случае для различных прогнозов (по одному и тому же методу) значения пространственно-энергетических параметров не совпадают. Поэтому формула для расчета  $J$  несколько видоизменена:

$$J = N_+ \left( \sum_i^I N(i) \cdot T_{\text{alarm}}(i) / T \right)^{-1},$$

где  $i$  – один из  $I$  различных вариантов “пространственно-энергетической” формулировки прогноза. Соответственно, все величины с индексом  $i$  относятся именно к этому варианту. Тогда выражение под знаком суммы даст нам среднее число “случайно” успешных реализаций прогноза с данными параметрами, а их суммирование по  $i$  даст общее число случайных угадываний. Смысл  $J$  и  $N_+$  остается без изменений.

В таблице 2 представлены значения эффективности  $J$  не всех методов, которые упоминались выше. Это связано с одной из следующих причин:



1) отсутствие землетрясений, которые бы соответствовали классу прогнозируемых за 14 лет работы КФ РЭС, 2) отсутствие успешно реализованных прогнозов, 3) методические проблемы оценки эффективности отдельных методов, связанные с их специфическими особенностями.

Представленные результаты не являются достаточно впечатляющими. Удивительного в этом ничего нет: проблема сейсмического прогноза широко известна. Но в данном случае мы не обсуждаем вопрос о существовании предвестников. Напомним, что получены оценки эффективности **процесса выдачи** непосредственно **прогнозов**, но не метода обнаружения предвестников, который лежит в их основе (и который мы никак не можем оценить, так как не работаем с данными наблюдений, а опираемся лишь на прогнозные заключения). Несмотря на небольшие значения эффективности, определенный оптимизм относительно улучшения величины  $J$  в будущем все-таки имеется. Основания для этого следующие: довольно много случаев, когда предвестники своевременно обнаруживались, но прогноз не признавался успешным из-за ошибок в определении пространственно-временных и энергетических рамок ожидаемого землетрясения. Иногда речь шла буквально о десяти часах или десятке километров, но мы вынуждены использовать, и использовали жесткие критерии оправдываемости прогноза. Тем не менее, такая малость ошибки позволяет надеяться, что методика интерпретации может быть скорректирована.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Камчатка является уникальным исследовательским полигоном с высоким уровнем сейсмической и вулканической активности. В связи с этим в регионе существует постоянная угроза возникновения чрезвычайных ситуаций природного и природно-техногенного происхождения, что требует выработки мер по снижению риска катастроф на основе современных научных разработок, в том числе на основе совершенствования комплексной оценки состояния и развития сейсмической и вулканической активности для Камчатского региона. Для решения этих задач и предназначена созданная система мониторинга и экспертной оценки состояния и развития сейсмической и вулканической активности.

Полученный и систематизированный за четырнадцать лет опыт выделения предвестников сильных землетрясений с оценками эффективности прогноза по различным методикам создают хорошую основу для повышения надежности и достоверности экспертных заключений о возможности сильного землетрясения на Камчатке.

Необходимыми условиями для успешного решения задачи, связанной с совершенствованием экспертной оценки состояния и развития сейсмической активности, получением надежных текущих оценок вероятности возникновения сильных землетрясений являются:

- техническое и информационное развитие имеющихся методов среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений Камчатки с магнитудами  $M \geq 6.0$  с оценкой их надежности и эффективности для вероятностной оценки параметров ожидаемого сейсмического события;
- создание новых методов среднесрочного и краткосрочного прогноза на основе изучения и комплексирования данных о сейсмических, деформационных, геофизических полях;
- создание базы данных предвестников;
- усовершенствование имеющихся и разработка новых методов и алгоритмов для вероятностной оценки параметров ожидаемого сильного землетрясения на основе данных как по отдельным методикам, так и по их комплексу.

Опыт изучения комплекса сейсмологических, гидрогеодинамических, гидрогеохимических, акустических, электромагнитных и др. видов предвестников показывает их приуроченность к заключительным стадиям подготовки сильных камчатских землетрясений, что позволяет уточнять место и время ожидаемого сейсмического события с точностью от первых лет до месяцев – недель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М.* Отражение процесса подготовки Кроноцкого землетрясения 05.12.97 во временных вариациях скорости спада огибающих кода-волн слабых землетрясений // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. С. 112–120.
- Богданов В.В., Бузевич А.В., Винницкий и др.* О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 259–278.
- Вартамян Г.С., Куликов Г.В.* Гидрогеодеформационное поле Земли // ДАН. 1982. Т. 262. № 2. С. 310–314.
- Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко и др.* Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 43–53.
- Гарагаш И.А.* Анализ изменений напряженного состояния земной коры при подготовке Кроноцкого землетрясения // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. С. 106–111.

- Гирина О.А.* 15 лет деятельности Камчатской группы реагирования на вулканические извержения // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 52–59.
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Камчатское отделение Федерального центра прогнозирования землетрясений: опыт работы и результаты // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 202–215.
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Предвестники камчатских землетрясений (по материалам Камчатского отделения Федерального центра прогнозирования землетрясений, 1998–2004 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 4. С. 3–13.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006б. № 3. С. 6–27.
- Гусев А.А.* Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.
- Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., Сенюков С.Л. и др.* Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеллов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 408–423.
- Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1 : 8000000 / Под ред. акад. Страхова В.Н., проф. Уломова В.И. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 4 листа.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
- Копылова Г.Н.* Оценка сеймопрогностической информативности данных равномерных наблюдений на скважине Е-1, Камчатка (по данным наблюдений 1996–2007 гг.) // Труды региональной науч.-техн. конф. “Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. В 2-х томах. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 2. С. 24–28.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Сизова Е.Г.* Изменения уровня воды в скважине Е-1 в связи с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. // Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”, Петропавловск-Камчатский, 30 марта–01 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 90–95.
- Кравченко Н.М.* Оценка достоверности сейсмического затишья, выделенного с помощью Z-теста, как предвестника сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 59–66.
- Кролевец А.Н., Павлюков В.К.* Приливной отклик импульсного электромагнитного излучения и краткосрочный прогноз сильных землетрясений // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. С. 175–185.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др.* Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Назарец В.П. и др.* Электромагнитное поле земли в изучении геодинамических процессов // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 152–170.
- Рыкунов Л.Н., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* Характерные параметры высокочастотного сейсмического шума перед сильными камчатскими землетрясениями 1996 г. // ДАН. 1998. Т. 361. № 3. С. 402–404.
- Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 1–7.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М.* Параметры сейсмичности Камчатки в 2003 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. № 3. С. 36–45.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А.* Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 57–65.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110–124.
- Сенюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
- Серафимова Ю.К.* Опыт прогнозирования сильных землетрясений на Камчатке в 60-х гг. XX в.–начале XXI в. специализированными советами // Труды Второй региональной научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 96–100.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Левина В.И.* Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогноза землетрясений на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 216–227.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64–74.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И.* Статистическая кинетика разрушения и прогноз сейсмичности

- ских явлений // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 955–959.
- Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П. и др.* О связи динамики подпочвенного радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле–августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49–59.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34–42.
- Чебров В.Н.* Организация работ по оценке сейсмической и вулканической активности на Камчатке // Труды региональной науч.-техн. конф. “Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. В 2-х томах. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 2. С. 4–8.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Десять лет деятельности Камчатского филиала РЭС по прогнозу землетрясений: достижения, проблемы, перспективы // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии “Вулканизм и геодинамика”. В 2-х томах. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. Т. 2. С. 677–680.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Комплексная оценка сейсмической опасности на Камчатке в 2005 г. // Материалы научно-технической конференции “Геофизический мониторинг Камчатки”, Петропавловск-Камчатский, 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский: Оттиск, 2006. С. 185–193.
- Широков В.А.* Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996–2000 гг. с магнитудой  $M = 6–7.8$  по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 95–116.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российской экспертного совета по оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- Широков В.А.* Тестирование методики оперативного прогноза сильных мировых землетрясений (ГЛОБАС) в реальном времени в период январь 2008–октябрь 2009 гг. // Труды Второй региональной научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 244–248.
- Gusev A.* Temporal variations of the coda decay rate on Kamchatka: are they real and precursory? // JGR. 1997. V. 102. № B4. P. 8381–8396.
- Wyss M., Habermann R.E.* Precursory seismic quiescence // Pure and applied geophysics. 1988. V. 126. № 2–4. P. 319–332.

## Identifying the Precursors of Large ( $M \geq 6.0$ ) Earthquakes in Kamchatka Based on Data from the Kamchatka Branch of the Geophysical Service: 1998–2011

V. N. Chebrov, V. A. Saltykov, and Yu. K. Serafimova

*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatskii, bul'var Piipa 9, 683006 Russia  
e-mail: chebr@emsd.ru*

**Abstract**—This paper describes the activities of the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council on Earthquake Prediction, Assessment of Seismic Hazard and Risk (KB REC) over a 14 year period. We provide brief information on how the KB REC functions, the methods that are used for earthquake prediction in expert assessments, forecasts, and precursors of  $M \geq 6.0$  Kamchatka earthquakes for the 1998–2011 period. The efficiency of prediction using several methods is estimated.