

# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКА ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

Копылова Г.Н.

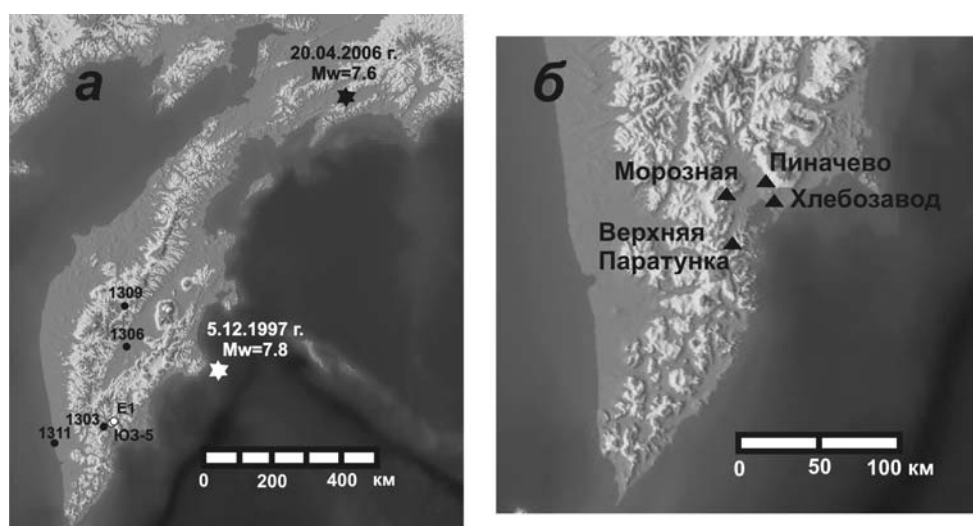
*Камчатский филиал Учреждения Российской академии наук Геофизической службы РАН,  
Петропавловск-Камчатский; e-mail: gala@emsd.ru*

## Введение

Гидрогеологический метод поиска предвестников землетрясений основывается на чувствительности подземной гидросферы к изменениям напряженно-деформированного состояния земной коры на стадиях подготовки землетрясений (Вартамян, Куликов, 1982; Киссин, 1993 и др.). Такая чувствительность может проявляться в аномальных изменениях гидродинамических (дебит, уровень, давление), гидрогеохимических (химический состав воды и газа) и геотермических (температура воды) параметров режима подземных вод перед сильными землетрясениями.

Основу гидрогеологического метода составляют проведение регулярных наблюдений за параметрами режима подземных вод на источниках, самоизливающихся и пьезометрических скважинах; статистическая обработка временных рядов данных наблюдений, направленная на выделение сигналов подготовки землетрясений; разработка методов оценки сейсмической опасности и прогнозирования землетрясений по данным гидрогеологических наблюдений.

На Камчатке такие исследования целенаправленно проводятся с 1977 г. Большой вклад в их развитие внесли Институт вулканологии (ИВ) ДВНЦ АН СССР (В.М. Сугробов, Г.Н. Копылова, Р.А. Шувалов, Л.В. Черткова), Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия (КОМСП) (с 2005 г. Камчатский филиал Геофизической службы РАН) (Ю.М. Хаткевич, Г.В. Рябинин, Г.Н. Копылова, А.А. Смирнов), Камчатский центр мониторинга сейсмической и вулканической активности при Администрации Камчатской области, ОАО «Камчатгеология» (КГ) (А.С. Желтухин, Н.Н. Смолина). Основные этапы развития гидрогеологической наблюдательной сети и методики исследований отражены в таблице. На рис. 1 представлены схемы расположения наблюдательных пунктов.



**Рис. 1.** Схемы расположения пьезометрических скважин КФ ГС РАН (светлые кружки) и ОАО «Камчатгеология» (темные кружки), на которых проводятся уровневые наблюдения (а), и пунктов гидрогеохимических наблюдений КФ ГС РАН, включающих самоизливающиеся скважины и источники (б). Звездами обозначены эпицентры двух сильнейших землетрясений: Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.,  $M=7.8$  и Олюторского землетрясения 20.04.2006 г.,  $M=7.6$ , произошедших за время наблюдений.

Развитие наблюдательной сети и методики гидрогеологических исследований

Дата	Содержание работ	Организация
Декабрь 1976 г.	Организация наблюдений на пункте Пиначево (3 источника, самоизливающаяся скв. ГК-1 глубиной Н=1261 м); измерение дебита, температуры, концентраций компонентов химического состава воды и свободного газа 1 раз в 3 суток.	ИБ КОМСП с 1979 г
Сентябрь 1983 г.	Организация наблюдений на пункте Морозная (самоизливающаяся скв. 1, Н=600 м); измерение дебита, температуры, концентраций компонентов химического состава воды 1 раз в 3 суток.	КОМСП
1986 г.	Внедрение методики определения химического состава газа, растворенного в воде.	ИБ, КОМСП
1987 г.	Организация урвнмерных наблюдений на скв. Е1, Н=665 м с использованием самописца «Валдай», периодичность регистрации 1 раз в сутки.	КОСМП
1989 г.	Организация наблюдений на скважинах пункта Верхняя Паратунка; измерение концентраций компонентов химсостава воды и растворенного газа 1 раз в 6 суток.	КОМСП
1992 г.	Организация наблюдений на пункте Хлебозавод (скв. Г-1, Н=2500 м); измерение концентраций компонентов химсостава воды и растворенного газа 1 раз в 3 суток.	КОМСП
1994 г.	Опубликование алгоритма оценки сейсмической опасности по данным гидрогеохимических наблюдений (Хаткевич, 1994; Копылова и др., 1994)	ИБ, КОМСП
Январь 1996 г.	Организация цифровой регистрации уровня воды на скв. Е1 (периодичность 10 мин) с использованием регистратора ГИП-3 и датчика уровня ДУ.	КЦМСИВА, ИФЗ
Сентябрь 1997 г.	Организация цифровой регистрации уровня воды на скв. ЮЗ-5, Н=800 м (периодичность 10 мин) с использованием регистратора ГИП-3 и датчика уровня ДУ.	КЦМСИВА, ИФЗ
2001- 2002 гг.	Модернизация системы урвнмерных наблюдений на скв. Е1 и ЮЗ-5; установка регистраторов Кедр-А2 и ультразвуковых датчиков уровня воды (ООО Полином, г. Хабаровск); периодичность регистрации 10 мин;	КОМСП
	- организация цифровых урвнмерных наблюдений на сети скважин ОАО «Камчатгеология» (скв. 1303, 1306, 1309, 1311);	КГ
	- внедрение программных средств информационной системы POLYGON для сбора, хранения и обработки данных урвнмерных наблюдений (Копылова и др., 2003).	КОМСП
2004 г.	Создание методики обработки данных урвнмерных наблюдений для выделения сигналов сейсмичности (Копылова, Бормотов, 2004).	КОМСП
2005- 2006 гг.	Организация цифровых урвнмерных наблюдений на скважинах ОАО «Камчатгеология» с периодичностью 10 мин	КГ
2007 г.	Модернизация системы урвнмерных наблюдений на двух скважинах ОАО «Камчатгеология»; использование регистратора Кедр-Д и телеметрической передачи данных (ООО Полином, г. Хабаровск).	КГ

В настоящее время гидрогеологическая наблюдательная сеть на Камчатке включает 9 самоизливающихся скважин и 3 источника, на которых проводятся наблюдения за химическим составом воды и газа с периодичностью 1 раз в 3-6 суток. В составе

подземной воды определяются pH, концентрации  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . В составе растворенного и свободного газа определяются методом газовой хроматографии  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , Ar,  $\text{CH}_4$ , He,  $\text{H}_2$ , углеводородные газы. Проводятся измерения дебита (объемным способом) и температуры воды. Наблюдения за вариациями уровня воды в скважинах и атмосферного давления с периодичностью 10 мин - 1 ч проводятся КФ ГС РАН и ОАО «Камчатгеология» на 6-ти пьезометрических скважинах с использованием автоматических средств регистрации, включающих универсальный цифровой регистратор Кедр А2, ультразвуковой датчик уровня воды и датчик атмосферного давления (ООО «Полином», г. Хабаровск).

Данные наблюдений представляют временные ряды параметров режима подземных вод длиной от первых лет до 30-ти лет, которые содержатся в пополняемых электронных базах данных в КФ ГС РАН и ОАО «Камчатгеология». В качестве дополнительной информации используются данные метеорологических наблюдений (температура воздуха, атмосферное давление, суточная сумма осадков) на метеостанции Пионерская Камчатского управления по гидрометеорологии и контролю окружающей среды и данные регистрации атмосферного давления и температуры воздуха на каждой станции.

Методика обработки данных гидрогеологических наблюдений в КФ ГС РАН включает построение временных рядов параметров режима скважин и источников, применение статистических методов анализа временных рядов, направленных на выделение аномальных изменений гидрогеологических параметров, в т. ч. барометрический и приливной анализ вариаций уровня воды (Копылова, 2001, 2006а; Копылова и др., 2000 и др.), многомерный анализ временных рядов данных гидрогеохимических наблюдений (Любушин и др., 1996, 1998), метод фликкер-шумовой спектроскопии (Рябинин, Хаткевич, 2007) и др.; систематизацию данных по аномальным изменениям параметров режима подземных вод в сопоставлении с произошедшими землетрясениями и разработку методов прогноза землетрясений по данным гидрогеологических наблюдений с оценкой их сейсмопрогностической эффективности.

В ОАО «Камчатгеология» для обработки данных уровневых наблюдений используется методика построения гидрогеодеформационного поля (ГГД-поля), принятая в МПР России (Вартанян, Куликов, 1982; Методические..., 2000; Смолина, 2008).

Основными результатами многолетних исследований являются обнаружение среднесрочных гидрогеологических предвестников, проявляющихся в аномальных изменениях уровня воды в скважинах, минерального и газового состава подземных вод преимущественно перед землетрясениями с магнитудами  $M \geq 6.6$  на расстояниях R до 200-300 км от пунктов наблюдений с заблаговременностью месяцы-недели (Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 1998, 2004, Копылова, 2001, 2006а). На основе выявленных гидрогеологических предвестников предложены методы среднесрочной оценки опасности возникновения сильных землетрясений на Камчатке. По данным гидрогеологических наблюдений регулярно (с периодичностью 1 раз в 1-2 недели) ответственными исполнителями работ в КФ ГС РАН (Г.Н. Копылова, Г.В. Рябинин, Ю.М. Хаткевич) и в ОАО «Камчатгеология» (Н.Н. Смолина) представляются прогнозные заключения в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, которые используются для подготовки заключений о сейсмической опасности в Камчатском крае.

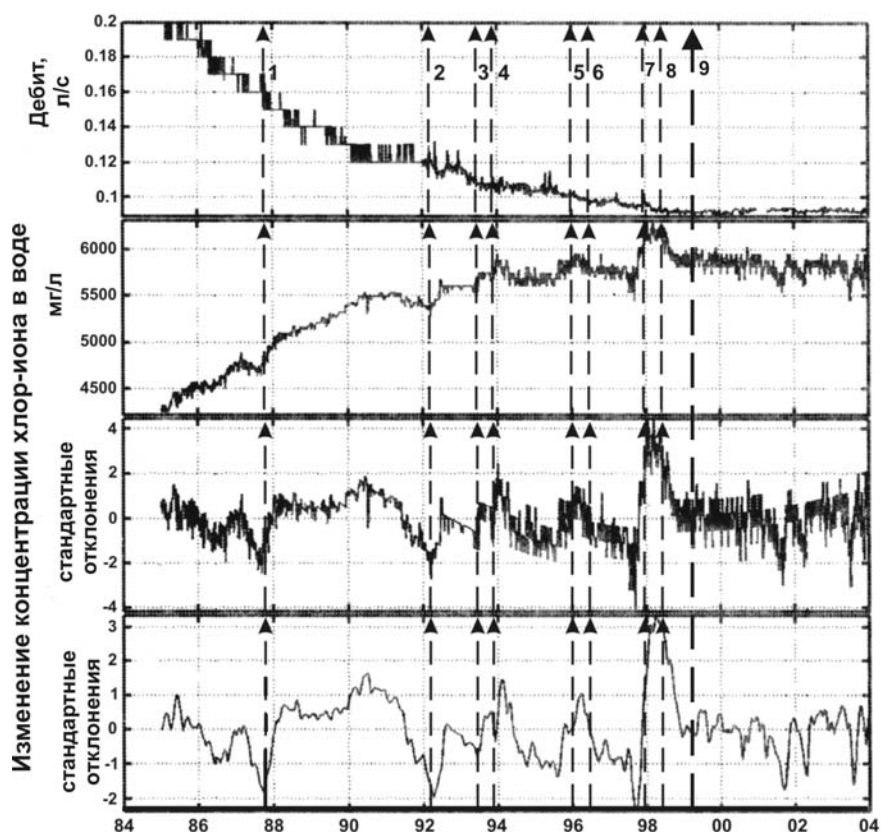
### **Гидрогеохимические предвестники камчатских землетрясений и оценка их сейсмопрогностической информативности**

Впервые яркие проявления гидрогеологических предвестников были зарегистрированы на пунктах Пиначево и Морозная перед Шипунскими землетрясениями 6.10.1987 г.,  $M=6.6$  и 2.03.1992 г.,  $M=6.9$ . Эти землетрясения произошли южнее Шипунского п-ова на расстояниях 110-130 км от наблюдательных пунктов и сопровождалась в г. Петропавловске-Камчатском сотрясениями интенсивностью 5-6 баллов по шкале MSK-64. Общим землетрясениям предшествовали гидрогеохимические

аномалии в составе подземных вод: понижение концентрации  $\text{Cl}^-$  и других компонентов глубинной составляющей (концентрации  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{J}$ ) в составе воды скважины ГК-1 в течение 7-ми и 9-ти мес.; понижение концентрации  $\text{HCO}_3^-$  в воде скважины Морозная в течение 1-ого месяца. В составе воды скважины Морозная перед вторым землетрясением наблюдалось также пропорциональное увеличение катионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  и перераспределение анионов за счет относительного роста концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  и уменьшения концентрации  $\text{HCO}_3^-$ . Минерализация воды увеличилась на 25%. Перед землетрясением 1992 г. в течение 2-х мес. также происходило увеличение амплитуды колебаний концентраций свободных газов. Наблюдались также и постсейсмические эффекты в изменениях дебитов, температуры и химического состава воды источников и скважин на пунктах Пиначево и Морозная (Копылова и др., 1994; Хаткевич, 1994).

На основе этих данных в работе (Копылова и др., 1994) был сформулирован алгоритм прогноза землетрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского по данным гидрогеохимических наблюдений на самоизливающихся скважинах: ««Наиболее выраженным признаком подготовки сильного землетрясения, сопровождающегося сотрясениями не менее 5-ти баллов в районе г. Петропавловска-Камчатского, является совместное проявление относительного уменьшения концентрации хлора в воде скв. ГК-1 в течение не менее 5 месяцев с аномальными вариациями других показателей режима источников и скважин: ..., уменьшением концентрации  $\text{HCO}_3^-$  и другими аномалиями химического состава воды скв. 1, появлением аномалий газового состава скв. ГК-1»».

На рис. 2 представлен график изменения концентрации хлора в воде скважины ГК-1 за 18 лет (1985-2003 гг.) из работы (Хаткевич, Рябинин, 2004).



**Рис. 2.** Изменения дебита и концентрации хлор-иона в воде скважины ГК-1, пункт Пиначево в 1985-2003 гг. (по Хаткевич, Рябинин, 2004 с добавлениями автора). Стрелками показаны моменты землетрясений с  $M \geq 6.6$ : **1** – 6.10.1987 г.,  $M=6.6$ ,  $R=120$  км, 4-5 баллов; **2** – 2.03.1992 г.,  $M=6.9$ ,  $R=110$  км, 5-6 баллов; **3** – 8.06.1993 г.,  $M=7.5$ ,  $R=210$  км, 5 баллов; **4** – 13.11.1993 г.,  $M=7.0$ ,  $R=140$  км, 5-6 баллов; **5** – 1.01.1996 г.,  $M=6.9$ ,  $R=110$  км, 4-5 баллов; **6** – 21.06.1996 г.,  $M=7.0$ ,  $R=210$  км, 4 балла; **7** – 5.12.1997 г.,  $M=7.8$ ,  $R=320$  км, 5-6 баллов; **8** – 1.06.1998 г.,  $M=6.9$ ,  $R=120$  км, 4-5 баллов; **9** – 9.03.1999 г.,  $M=7.0$ ,  $R=140$  км, 5 баллов.

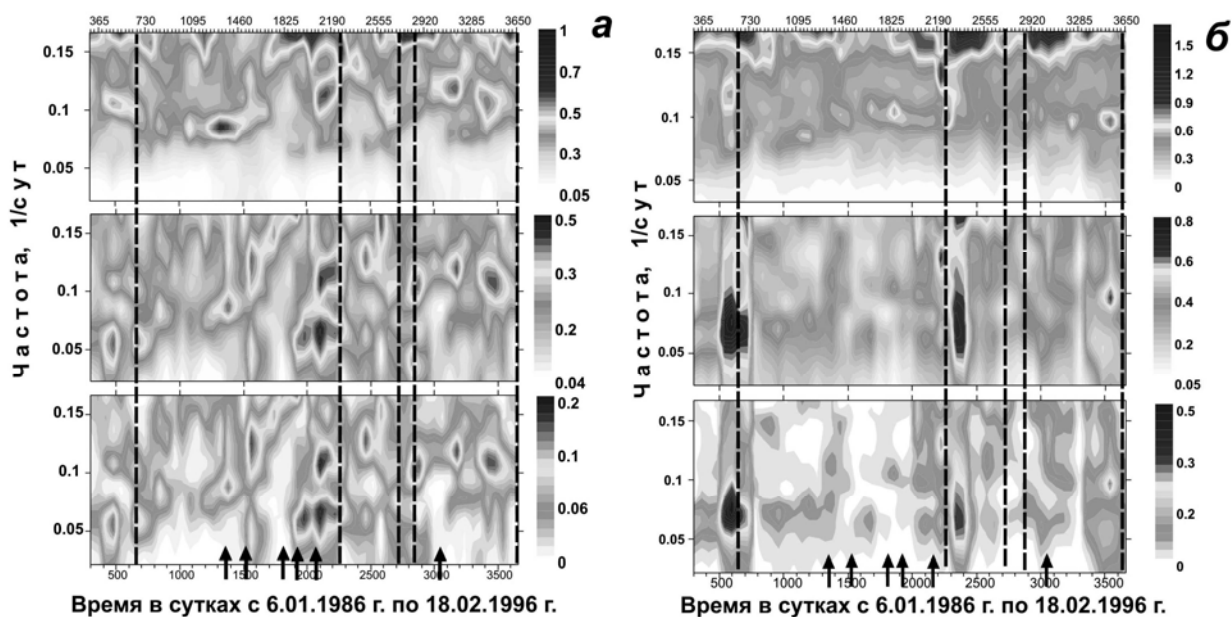
Вертикальными линиями показаны моменты землетрясений с величинами магнитуд от 6.6 до 7.8, произошедшие на расстояниях  $R=110-320$  км от скважины. Таких землетрясений было 9, и все они сопровождались ощутимыми сотрясениями с интенсивностью не менее 4-5-ти баллов в районе г. Петропавловска-Камчатского. Перед 6-тью событиями (1-5, 7) проявлялись понижения концентрации хлора продолжительностью от 1-ого до 9-ти мес. Перед 3-мя событиями (6, 8-9) понижение концентрации хлора не наблюдалось. Следует отметить, что эти три землетрясения происходили через относительно небольшие промежутки времени после предшествующих сильных событий: землетрясение в июне 1996 г. - через 0.5 года после события 1.01.1996 г. в Карымском вулканическом центре, и землетрясения 1998 и 1999 гг. - через 0.5 года и 1 год 4 месяца после сильнейшего Кроноцкого землетрясения.

Результаты многолетних наблюдений на скважине ГК-1 показывают, что вероятность связи «предвестника» в форме понижения концентрации хлора в воде и сильных землетрясений составляет порядка 0.7 ( $p=6/9$ ). Также очевидно, что для этой системы «скважина-резервуар подземных вод» характерно некоторое время релаксации ее свойств после сильных сейсмических воздействий, когда гидрогеохимический предвестник проявляться не может. Для того, чтобы он проявлялся, необходимо достаточно продолжительное время, чтобы система вернулась в квазистационарное состояние. После сильных землетрясений, сопровождающихся интенсивными сотрясениями, в течение длительного времени проявляются постсейсмические изменения гидрогеохимических и гидродинамических параметров режима подземных вод, когда свойства системы «скважина-резервуар» изменяются, и запускается длительный процесс их восстановления.

Для повышения эффективности обработки временных рядов данных гидрогеохимических наблюдений на самоизливающихся скважинах и источниках применялись методы многомерного статистического анализа, разработанные д.ф.-м.н. А.А. Любушиным (Любушин, 2007). Используемые методы направлены на формализованное выделение сигналов синхронизации в совокупных изменениях наблюдаемых параметров режима подземных вод, фиксирующие временные и частотные интервалы увеличения амплитуд или повышения стабилизации фаз отдельных спектральных компонент в изменениях всех или большинства временных рядов, составляющих многомерные ряды (Любушин и др., 1996, 1998).

На рис. 3 представлены примеры частотно-временных диаграмм эволюции информативных статистик двух многомерных временных рядов данных наблюдений на скважинах 1 и ГК-1 за 10-летний период, включающий 5 сильных землетрясений. Проявление максимумов статистик указывает на наличие сигналов синхронизации в изменениях многомерных рядов в соответствующих частотных и временных диапазонах. В изменениях многомерных временных рядов выделяются сигналы синхронизации, предшествующие сильным землетрясениям и постсейсмические сигналы. Часто сигналы синхронизации сливаются, т. е. сигнал-предвестник последовательно сменяется постсейсмическим сигналом.

Следует отметить, что в изменениях 4-хмерного ряда данных наблюдений на скважине 1 Морозная (рис. 3а) сигналы синхронизации предшествовали всем 5-ти сильным землетрясениям. В изменениях 5-мерного ряда данных наблюдений за концентрациями свободных газов яркие предсейсмические сигналы синхронизации проявлялись перед 3-мя землетрясениями (рис. 3б). В этом случае отсутствие аномалий газового состава перед двумя землетрясениями 1993 г., по-видимому, связано с релаксацией свойств системы «скважина-резервуар» после Шипунского землетрясения 2.03.1992 г. Следует отметить, что при возникновении землетрясений с  $M=5-6$  выделяются, в основном, постсейсмические сигналы синхронизации в изменениях комплекса параметров режима самоизливающихся скважин и источников.



**Рис. 3.** Частотно-временные диаграммы эволюции (сверху вниз) максимального собственного числа спектральной матрицы, среднего значения квадратов покомпонентных канонических когерентностей и произведения покомпонентных канонических когерентностей 4-хмерного ряда данных наблюдений (дебит, температура воды, концентрации гидрокарбонат-иона и кремниевой кислоты) на скважине 1, пункт Морозная (*а*) и 5-мерного ряда данных измерения концентраций свободных газов (метана, азота, аргона, гелия и углекислого газа), выделяющихся из скважины ГК-1, пункт Пиначево (*б*) за период с 6.01.1986 г. по 18.02.1996 г. Пунктирными вертикальными линиями обозначены землетрясения с  $M \geq 6.6$ . Стрелками обозначены землетрясения с  $M = 5-6$ . Оценка информативных статистик производилась в окне 300 сут с шагом 60 сут.

Выявленные сигналы синхронизации в изменениях многомерных временных рядов данных наблюдений на самоизливающихся скважинах и источниках, предшествующие сильным камчатским землетрясениям, представляют специфическую форму формализованных статистических гидрогеологических предвестников и указывают на развитие аномальных физико-химических состояний в подземных водоносных системах на стадиях подготовки таких землетрясений. На примере 10-летнего временного интервала вероятность связи таких предвестников и сильных землетрясений для различных водопроявлений составляет  $p = 1(5/5) - 0.6(3/5)$ .

В работе (Копылова, 1992) выполнена оценка сейсмопрогностической информативности данных гидрогеохимических наблюдений на пункте Пиначево для относительно спокойного в сейсмическом отношении периода 1979-1988 гг. по методике (Гусев, 1974). Полученные величины прогнозной эффективности для отдельных компонентов химического состава воды Пиначевских источников 1 и 2 и скважины ГК-1 и комплекса гидрогеохимических параметров отдельных водопроявлений систематически выше единицы и составляют 1.5-2. Это указывает на определенную «полезность» использования гидрогеохимических предвестников для среднесрочного прогноза сильных камчатских землетрясений. Но, учитывая, в целом относительно небольшие величины их сейсмопрогностической эффективности, использование гидрогеохимические предвестники целесообразно только в комплексе с данными других сейсмопрогностических методов.

### **Уровнемерные наблюдений на пьезометрических скважинах и оценка сейсмопрогностической информативности**

Проведение уровнемерных наблюдений в скважинах с периодичностью 10 мин. позволило получить принципиально новые данные о сейсмогидрогеодинамических процессах в системах скважина-резервуар. В работах (Копылова, 2001, 2006а; Копылова и

др., 2000, 2008) описаны различные типы сигналов сейсмичности в изменениях уровня воды: гидродинамические предвестники, косейсмические скачки порового давления при образовании разрывов в очагах землетрясений; разнообразные постсейсмические изменения, вызванные прохождением сейсмических волн, как от местных, так и от сильных телесеизмических событий. Установлены основные закономерности формирования отклика уровня воды в скважинах на сейсмические воздействия, определяющиеся комплексом локальных условий, в частности, упругими и фильтрационными свойствами резервуаров, строением скважин, гидрогеологическими условиями, такими как степень изолированности резервуара и состав порового флюида. Важным результатом гидрогеодинамических исследований в скважинах является также понимание того, что на стадиях подготовки землетрясения может происходить как упругое деформирование резервуаров подземных вод при развитии предсейсмических движений в области будущего очага, так и увеличение емкости водовмещающих пород при развитии в них трещинной дилатансии.

В связи с Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г.,  $M=7.8$  (рис. 1а) в изменениях уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 зарегистрирован гидрогеодинамический предвестник, проявившийся в течение 3-х недель в синхронном понижении уровня воды в обеих скважинах (Копылова, 2006а). В связи с Олюторским землетрясением 20.04.2004 г.,  $M=7.6$  (рис. 1 а), эпицентр которого находился на расстоянии  $R=750-1150$  км от наблюдательных скважин, наблюдались, в основном, постсейсмические изменения уровня воды, вызванные прохождением сейсмических волн. При этом в трех скважинах, расположенных в районе г. Петропавловска-Камчатского, были выявлены синхронные аномальные вариации уровня воды, которые, возможно, были вызваны активизацией геодинамических процессов на прилегающем участке Камчатской сейсмофокальной зоны. Факт этот, несомненно, интересный и требует дальнейшего осмысления.

По данным многолетних наблюдений на скважине Е1 обнаружено регулярное проявление гидрогеодинамического предвестника перед землетрясениями с  $M \geq 5$  на расстояниях до 350 км в форме увеличения скорости понижения уровня воды (Копылова, 2001, 2008). Ретроспективная оценка эффективности предвестника для прогнозирования таких землетрясений в 1997-2007 гг. показала, что предвестник проявлялся перед 14-тью землетрясениями из 21-ого произошедшего. Отсюда вероятность связи предвестника и землетрясений составляет  $p=0.7$  (14/21). Отношение времени тревоги к общему времени наблюдений составляет от 1/5 до 1/3. Отсюда ретроспективная оценка эффективности предвестника для прогноза составляет 3.2-2.1 (Копылова, 2008). Т. е. гидрогеодинамический предвестник в изменениях уровня воды в скважине Е1 является полезным для среднесрочного прогноза таких землетрясений. Установлена также положительная корреляция времени и заблаговременности проявления гидрогеодинамического предвестника от величины магнитуды землетрясения. Это свойство гидрогеодинамического предвестника позволяет уточнять величину магнитуды прогнозируемого землетрясения.

### **Заключение**

По данным многолетних наблюдений информативность гидрогеологического метода для среднесрочного прогноза камчатских землетрясений с  $M \geq 7$  характеризуется величинами ретроспективной сейсмопрогностической эффективности 2-3 при вероятности связи гидрогеологических предвестников и землетрясений 0.7-0.8.

В режиме отдельных самоизливающихся скважин и источников прослеживается эволюция во времени физико-химических состояний в питающих их водоносных системах. При этом процессы самоорганизации в подземных водоносных системах способны как повышать, так и понижать их чувствительность к процессам подготовки землетрясений. При этом чувствительность водоносных систем к процессам подготовки землетрясений после сильных сейсмических событий обычно понижается.

В качестве ведущего механизма образования гидрогеохимических и гидрогеодинамических предвестников рассматривается развитие на стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений трещинной дилатансии в водовмещающих породах, увеличение их емкости, изменение проницаемости и гидродинамического взаимодействия контрастных по химическому составу подземных вод в зонах повышенной водопроницаемости (Копылова, 2006б). В случае Кроноцкого землетрясения проявление гидрогеодинамического предвестника в двух скважинах могло быть связано с квазиупругим деформированием резервуаров подземных вод при развитии предсейсмических движений в области очага будущего землетрясения.

Развитие гидрогеологического метода поиска предвестников землетрясений связано с автоматизацией гидрогеохимических наблюдений на самоизливающихся скважинах и источниках и использованием интегральных показателей химического состава воды (например, ее электропроводности). Необходимо также обеспечить регистрацию уровня воды с периодичностью не более 1 с и создать единую пополняемую открытую базу данных гидрогеологических наблюдений.

Основной научно-методической задачей гидрогеосейсмологических исследований является разработка новых и совершенствование имеющихся моделей формирования гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников, ко- и постсейсмических эффектов, проявляющихся в режиме отдельных наблюдательных скважин и источников, с учетом локальных гидрогеологических условий и особенностей формирования их гидродинамического и гидрогеохимического режима.

### Список литературы

*Вартанян Г.С., Куликов Г.В.* Гидрогеодеформационное поле Земли // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 310-314.

*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.

*Киссин И.Г.* Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58-69.

*Копылова Г.Н.* Анализ влияния сейсмичности на режим Пиначевских термопроявлений на Камчатке (по результатам наблюдений в 1979-1988 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 3-18.

*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.* Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 6. С. 52-64.

*Копылова Г.Н.* Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006б. № 1. Вып. № 7. С. 50-66.

*Копылова Г.Н.* Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных наблюдений на скважине Е1, Камчатка (по данным наблюдений 1996-2007 гг.) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24-28.

*Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М.* Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53-37.

*Копылова Г.Н., Любушин А.А., Малугин В.А. и др.* Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69-79.



*Копылова Г.Н., Латыпов Е.Р., Пантюхин Е.А.* Информационная система «Полигон»: комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Матер. междунар. геофиз. конф. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. С. 393–399.

*Копылова Г.Н., Бормотов В.А.* Эффекты сейсмичности в изменениях уровней воды глубоких скважин сейсмоактивных районов Дальнего Востока: методика диагностики и результаты // Закономерности строения и эволюции геосфер: Матер. VI междунар. междисциплин. научн. симпоз. Хабаровск: ДВО РАН, 2004. С. 134–149.

*Копылова Г.Н., Смолина Н.Н.* Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки в связи с сильнейшими ( $M \geq 7.6$ ) землетрясениями // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 175-179.

*Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.

*Любушин А.А., Копылова Г.Н., Хаткевич Ю.М.* Применение многомерного анализа для обработки данных гидрогеологических наблюдений на Петропавловском полигоне, Камчатка, с целью поиска предвестников сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1996. № 1. С. 79-97.

*Любушин А.А., Копылова Г.Н., Хаткевич Ю.М.* Анализ спектральных матриц данных гидрогеологических наблюдений на Петропавловском полигоне, Камчатка, в сопоставлении с сейсмическим режимом // Физика Земли. 1997. № 6. С. 79-89.

Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система R-STEPS). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. 77 с.

*Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М.* Использование метода фликкер-шумовой спектроскопии в задаче идентификации гидрогеохимических предвестников землетрясений // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 44-48.

*Смолина Н.Н.* Мониторинг гидрогеодеформационного поля в Камчатском крае // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-технич. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 79-83.

*Хаткевич Ю.М.* О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше пяти баллов, проявляющихся в г. Петропавловске-Камчатском // Вулканология и сейсмология. 1994. № 1. С. 63-67.

*Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 96-112.