

УДК 550.341.5

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ (НА ПРИМЕРЕ ПИНАЧЕВСКИХ ИСТОЧНИКОВ НА КАМЧАТКЕ)

**Г.В. Рябинин, Ю.М. Хаткевич**

*Камчатский филиал ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: [gena@emsd.iks.ru](mailto:gena@emsd.iks.ru), [khat@emsd.iks.ru](mailto:khat@emsd.iks.ru)*

С 1977 г. на Камчатке проводятся непрерывные наблюдения за режимом подземных вод. Целью исследований является анализ воздействия землетрясений и процессов их подготовки на состояние подземной гидросферы. Важнейшая прикладная задача заключается в оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского и его окрестностей по данным гедрогеохимического мониторинга. Наблюдения за режимом подземных вод осуществляются на четырех гидрогеологических станциях, включающих в себя, в общей сложности, 12 водопунктов (8 самоизливающихся скважин и 4 слаботермальных источника). Результаты наблюдений показывают, что все землетрясения,

проявившиеся в Петропавловске-Камчатском интенсивностью 3 и более баллов, вызывают послесейсмические изменения режима подземных вод, которые наиболее ярко проявляются в режиме Пиначевских слаботермальных источников. Землетрясения интенсивностью 4 и более баллов часто предваряются аномальными изменениями макрокомпонентного и газового состава воды самоизливающихся скважин. Настоящая работа посвящена анализу послесейсмических возмущений расхода воды Пиначевских источников.

Гидрогеологические эффекты в режиме подземных вод, наблюдаемые после сильнейших землетрясений, известны очень давно. К ним относятся: колебания уровня воды в колодцах и скважинах, кратковременные фонтаны, струи и гейзеры, изменение объемов добычи нефти и газа, изменения химического и газового состава подземных вод и нефтегазовых месторождений. Поражает разнообразие форм и характера послесейсмических изменений, одна морфологическая типизация которых достойна отдельной научной работы. Все это свидетельствует о том, что сейсмичность, в особенности сильнейшие сейсмические события, необходимо рассматривать как один из главных режимобразующих факторов подземных вод.

### ***Характеристика режима Пиначевских источников***

Пиначевские источники находятся в среднем течении р. Пиначевой, примерно в 35 км от г. Петропавловска-Камчатского и в 14 км от г. Елизово. Здесь же (в 100 м от источников) находится наблюдательная скважина ГК-1 глубиной 1261 м. В геолого-структурном отношении Пиначевские источники приурочены к южной границе большого массива андезито-дацитов плиоценового возраста (высота 202.0), слагающих окрестные возвышенности. Вокруг распространены нормально-осадочные четвертичные отложения. Разгрузка гидротерм происходит в зоне влияния Петропавловского глубинного разлома. Высота 202.0, у подножия которой наблюдается разгрузка термальных вод, является самой южной из возвышенностей, составляющих предгорья Пиначевского хребта и Корякско-Авачинской вулканотектонической гряды. Вдоль южных и восточных склонов высоты наблюдается интенсивная разгрузка холодных пресных вод. Очаги разгрузки термальных вод представляют собой восходящие источники. В головках источников обнажаются плотные, сильно трещиноватые, а иногда раздробленные до щебенки андезиты. Следов гидротермальных изменений в андезитах не наблюдается [9]. Химический состав Пиначевских гидротерм формируется в результате смешения нисходящего потока пресных холодных вод и восходящего потока термальных вод [6]. В настоящее время наблюдения проводятся на четырех источниках: № 1, № 2/1, № 2/2 и № 3. Источники № 1, № 2/1 и № 2/2 оборудованы бетонными плотинами со сливной трубой и деревянными, обшитыми рубероидом будками, что исключает воздействие на режим источников дождевых и талых вод. Источник № 3 оборудован треугольным водосливом. Измерения на источниках проводятся с частотой 1 раз в 3 дня. Расход источников слабо реагирует на изменения атмосферного давления и практически не подвержен сезонным вариациям. Комплекс наблюдений включает в себя: замер температуры воздуха и атмосферного давления, измерение расхода и температуры воды, отбор водных и газовых проб. В пробах воды в лабораторных условиях определяются рН, концентрации основных макрокомпонентов и кислот, концентрации растворенных в воде газов и т.д., всего 21 параметр. Температура воды и воздуха измеряется срочным термометром. Атмосферное давление замеряется в мм рт. ст. барометром «М 67». Расход воды источников измеряется объемным методом. Ошибка измерений не превышает 2%. Химический и газовый анализ водных проб производится на базе аналитического центра Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. По химическому составу воды источников № 1, № 2/1 и № 2/2 относятся к гидрокарбонатно-хлоридному, магниевому-натриевому типу. В составе растворенных газов преобладает метан. Химический состав воды источника № 3 - хлоридно-гидрокарбонатный, магниевом-натриевый. В составе газов преобладает азот. Далее будут рассматриваться данные изменения расхода воды источников № 1 и № 2/1, поскольку только для этих источников имеются непрерывные ряды наблюдений, начиная с 1977 г.

На рисунке 1 представлены временные ряды изменения расхода воды источников № 1 и № 2/1. Послесейсмические изменения расхода источников можно условно разделить на три

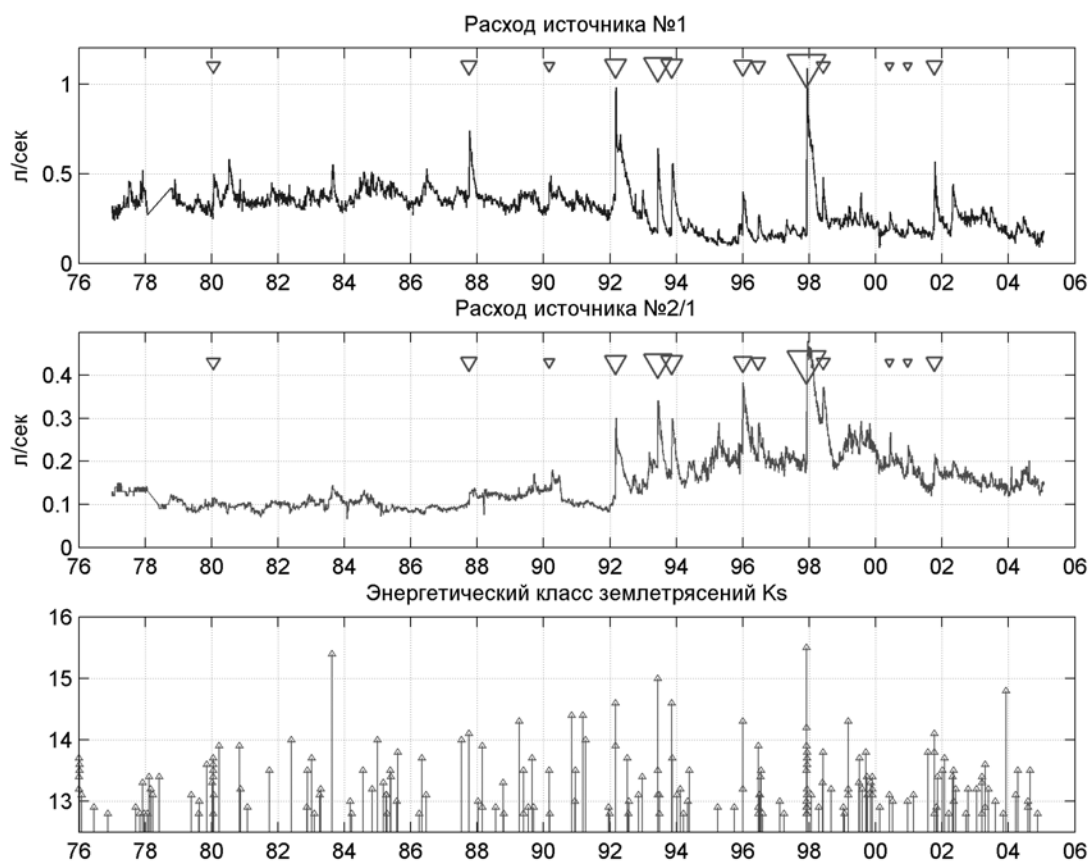


Рис. 1. Графики изменения расхода воды источников № 1 и № 2/1 в сопоставлении с сейсмичностью. Треугольными маркерами обозначены моменты землетрясений, вызвавших anomальные послесейсмические возмущения расхода. Размер маркеров пропорционален энергии землетрясений.

фазы (рис. 2). На первой - происходит скачкообразное увеличение расхода. Длительность этой фазы возмущения в среднем равна одним суткам. К сожалению, из-за низкой дискретности опробования (1 раз в трое суток), точный период времени, от момента землетрясения до начала возмущения неизвестен. Однако есть все основания предполагать, что этот временной интервал не превосходит нескольких часов. Минимальный промежуток времени (около 3 часов) между моментом сейсмического толчка и режимным опробованием был зарегистрирован для расхода воды источника №1 в связи с землетрясением 17.06.86 г. ( $K_s = 13.1$ , эпицентрального расстояния  $S = 155$  км). Несмотря на то, что это сейсмическое событие было относительно слабым, после него наблюдался резкий скачок величины расхода воды источника. Вторая, переходная фаза представляет собой либо небольшое повышение дебита до величины его максимального значения, либо незначительные осцилляции около экстремума. Длительность второй фазы в среднем составляет около двух суток. Третья фаза характеризуется относительно медленным восстановлением значений параметров, которое происходит по экспоненциальному закону. В ряде случаев отмечается отсутствие второй фазы, когда после скачкообразного увеличения расхода воды сразу начинается его восстановление.

#### ***Стохастическая модель реакции Пиначевских источников на сейсмическое воздействие***

Под стохастической моделью понимается модель линейной системы, поведение которой можно описать с помощью стохастических разностных уравнений подобно тому, как непрерывные линейные системы описываются дифференциальными уравнениями. Определение структуры, порядка модели и оценка параметров (коэффициентов) есть суть задачи идентификации. Задача идентификации - процедура многоэтапная. На первом этапе -

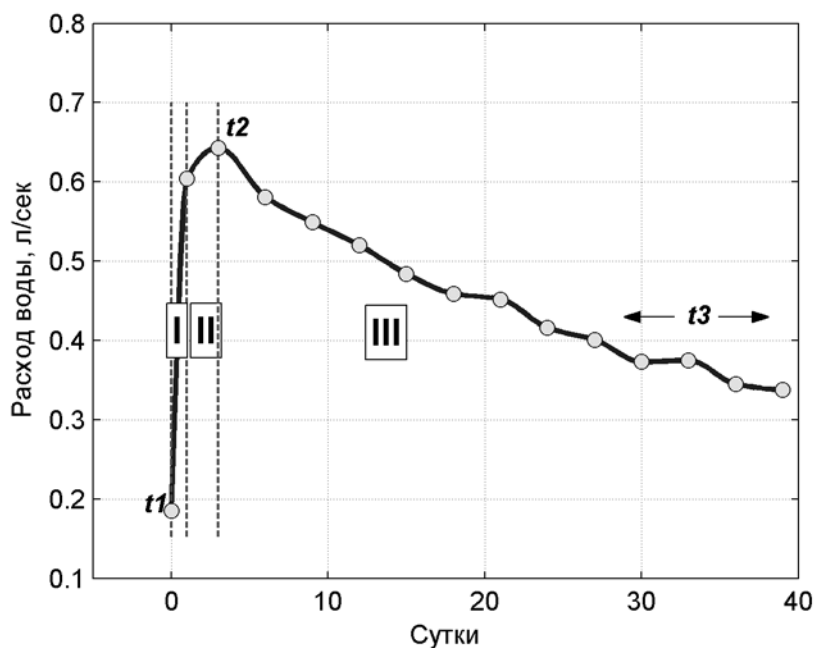


Рис. 2 Пример послесейсмического возмущения расхода источника № 1 в связи с землетрясением 8.06.1993 г. Римскими цифрами на диаграмме обозначены фазы возмущения.  $t_1$  - дата последнего замера расхода воды источника перед землетрясением,  $t_2$  - дата, соответствующая максимальному значению расхода после землетрясения,  $t_3$  - дата, соответствующая моменту полного восстановления расхода воды после сейсмического события.

структурной идентификации на основании теоретических соображений определяется структура модели. Второй этап - параметрической идентификации заключается в оценке параметров модели. Третий этап - проверка адекватности подобранной модели фактическим данным. Наиболее простой случай оценки структуры и порядка модели представляется тогда, когда на вход системы подаются «специальные» сигналы. Обычно рассматриваются три типа таких сигналов: ступенчатые сигналы для идентификации по переходной функции, импульсные сигналы для идентификации по импульсной характеристике и синусоидальные сигналы с разными частотами для идентификации по частотной характеристике [1]. Если рассматривать скачкообразное увеличение расхода воды источников после землетрясения (I фаза возмущения) как дельта-импульс, то экспоненциальный характер восстановления (III фаза) можно интерпретировать как импульсную характеристику системы «пласт-источник». Действительно, как предполагалось выше, если длительность I фазы возмущения изменяется от нескольких часов до суток, то этот временной интервал будет меньше периода наивысшей гармоники с частотой  $f = 1/\Delta T$ , где  $\Delta T = 3$  суткам-дискретность наблюдений. В этом случае, рассматривать первую фазу как дельта-импульс вполне допустимо [1]. Появление второй, переходной фазы может быть связано, во-первых, с тем, что на практике входной сигнал в системе является лишь некоторым приближением к дельта-импульсу и имеет, в отличие от него, некоторую длительность [1]. Во-вторых, послесейсмические возмущения расхода, как правило, являются следствием не единичного сейсмического события, а совокупного воздействия на гидродинамическую систему главного толчка и его афтершоков. Третья фаза возмущения, как уже отмечалось, имеет экспоненциальный характер затухания. Экспоненциальные процессы развития систем, если на вход подается возбуждающее воздействие, в большинстве случаев хорошо описываются линейными дифференциальными уравнениями первого порядка [2]. Общим определением для подобного класса систем является то, что скорость изменения состояния системы пропорциональна уровню ее состояния [1]. Простейшим механическим аналогом таких систем является устройство, предназначенное для того, чтобы двери не хлопали, состоящее из пружины и буфера [3]. Стохастическим аналогом дифференциального уравнения первого порядка является уравнение авторегрессии первого порядка, имеющее вид:

$$y_t - \mu = a_1(y_{t-1} - \mu) + u_t \quad (1),$$

где  $u$  – входной процесс,  $y$  – процесс на выходе системы,  $\mu$  – некоторый начальный уровень,  $a_1$  – параметр авторегрессии. Если на вход рассматриваемой линейной системы подать дельта-импульс, то импульсная характеристика будет полностью определяться параметром  $a_1$ . Таким образом, задача идентификации рассматриваемой нами модели «пласт-источник» сводится к определению параметра  $a_1$  по данным, соответствующим стадии восстановления расхода (III фаза послесейсмического возмущения).

#### **Подготовка фактических данных к анализу**

Первой проблемой, которая возникла при подготовке фактических данных, была проблема выделения послесейсмических вариаций на фоне шумовой компоненты. Задача решалась следующим образом. В начале фактические временные ряды изменений расходов первого и второго источников приводились к рядам в приращениях (дифференцировались). Это делалось для того, чтобы выявить те моменты времени, в которые скорость изменения расхода воды была наибольшей, что как раз характерно для первой фазы послесейсмической реакции. Затем по значениям дифференцированных рядов оценивались доверительные интервалы, равные  $\mu \pm 3\sigma$  где:  $\mu$  – среднее значение,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение. Те значения, которые выходили за пределы верхней границы доверительного интервала, считались аномальными. Все выделенные таким образом значения соответствовали наиболее сильным сейсмическим событиям, произошедшим за рассматриваемый период (таблица).

#### **Результаты параметрической идентификации модели авторегрессии первого порядка**

Землетрясения			Источник № 1				Источник № 2			
Дата	Ks	$\Delta$ , км	A	a	СКО	СКО %	A	a	СКО	СКО %
23.01.80	13.7	183	0.17	0.9734	0.023	13.80	-	-	-	-
06.10.87	14.1	134	0.37	0.9701	0.017	4.70	-	-	-	-
01.03.90	13.5	121	0.11	0.9544	0.027	24.50	-	-	-	-
02.03.92	14.6	137	0.59	0.9759	0.085	14.30	0.16	0.9836	0.011	7.10
08.06.93	15	246	0.46	0.9674	0.011	2.40	0.17	0.9744	0.008	4.60
13.11.93	14.6	179	0.46	0.9766	0.017	3.70	0.15	0.9704	0.008	5.40
01.01.96	14.3	87	0.24	0.9695	0.020	8.30	0.17	0.9797	0.009	5.10
21.06.96	13.9	249	0.13	0.9660	0.011	8.40	0.09	0.9707	0.006	7.30
05.12.97	15.5	304	0.93	0.9837	0.068	7.30	0.28	0.9935	0.023	8.10
01.06.98	13.8	145	0.21	0.9328	0.010	4.80	0.07	0.9671	0.008	10.60
03.06.00	13.1	177	-	-	-	-	0.06	0.9561	0.009	15.30
20.12.00	13	109	-	-	-	-	0.07	0.9693	0.008	12.10
08.10.01	14.1	163	0.28	0.9648	0.032	11.50	0.09	0.9665	0.010	10.70
<b>Среднее значение</b>				<b>0.9668</b>	<b>0.029</b>	<b>9.43</b>		<b>0.9731</b>	<b>0.010</b>	<b>8.63</b>

Ks – энергетический класс землетрясения,  $\Delta$  – эпицентральное расстояние, A – амплитуда аномалии (л/сек), a – параметр модели авторегрессии первого порядка, СКО – среднеквадратическое отклонение остатков модели, СКО% – среднеквадратическое отклонение в процентах от амплитуды аномалии.

Далее каждая послесейсмическая аномалия анализировалась отдельно в том смысле, что для каждого случая оценивался свой параметр  $a_1$  процесса авторегрессии первого порядка. Чтобы пояснить эту процедуру, введем следующие характеристики:  $t_1$  – дата последнего замера расхода воды источника перед землетрясением;  $t_2$  – дата, соответствующая максимальному значению расхода после землетрясения;  $t_3$  – дата, соответствующая моменту полного восстановления расхода воды после сейсмического события. Каждая послесейсмическая аномалия «вырезалась» из общего ряда в интервале времени  $t_1 - t_3$ . Если

моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  определяются однозначно, то момент времени  $t_3$  точно определить нельзя. Однако, известно, что затухание можно характеризовать временем, за которое амплитуда уменьшается до величины, составляющей  $e^{-1} = 0.368$  ее начального значения ( $e$  - экспонента) [8]. С учетом этого, момент времени  $t_3$  выбирался по возможности наибольшим, но принадлежащим интервалу  $0.368A_{\max} - A_{\min}$  где:  $A_{\max}$  - максимальное значение амплитуды послесейсмического значения расхода,  $A_{\min}$  - минимальное значение расхода воды, соответствующее моменту времени  $t_1$ . После того, как все послесейсмические аномалии были выделены из общих рядов, их значения приводились к нулевым начальным условиям путем вычитания величины  $A_{\min}$  для каждой аномалии в отдельности.

#### **Параметрическая идентификация (оценка параметра $a_1$ )**

Как уже было замечено выше, оценка параметра стохастического уравнения авторегрессии первого порядка проводилась по интервалу  $t_2 - t_3$ , который соответствует 3 фазе послесейсмического возмущения, определенной нами, с некоторыми допущениями, как импульсная характеристика системы «пласт-источник». Параметрическая идентификация осуществлялась на базе пакета System Identification Toolbox программы Matlab. Оценка параметров моделей заданной структуры в этом пакете основана на методе минимизации ошибки прогноза (Predictive Error Method) [4]. Графики фактических и расчетных импульсных характеристик, иллюстрирующие результаты идентификации используемой модели, представлены на рис. 3. На рисунке видно, что рассчитанная на основе AR-модели импульсная характеристика хорошо соответствует фактическим данным послесейсмического изменения расхода воды. Это свидетельствует об адекватности используемой модели. В таблице сведены результаты оценки параметра  $a_1$  и величины среднеквадратической ошибки в процентах от амплитуды послесейсмических аномалий, которая в среднем не превышает 10 %, что также указывает на хорошее соответствие модели фактическим данным.

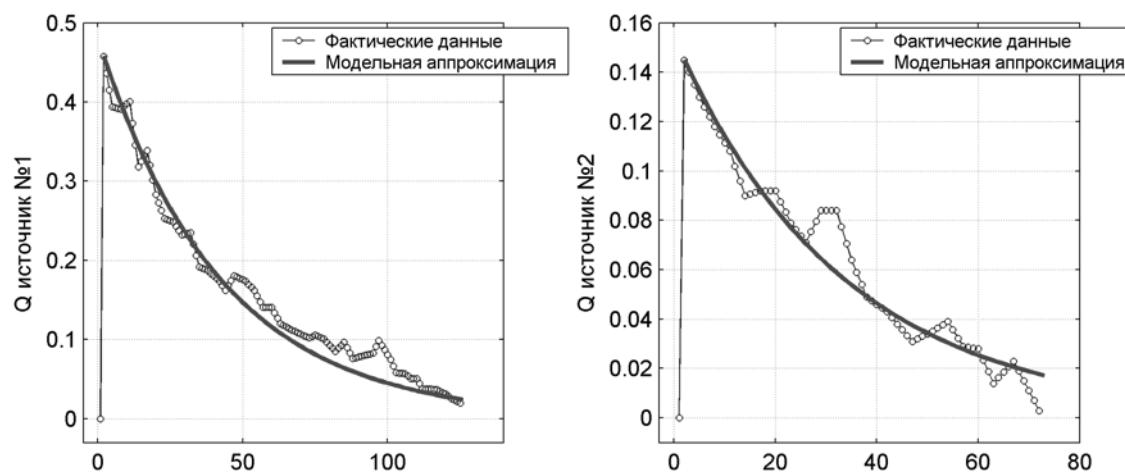


Рис. 3 График послесейсмических возмущений расхода Пиначевских источников в связи с землетрясением 13.11.1993 г и их аппроксимация, построенная на основе AR-модели первого порядка.

До сих пор при параметрической идентификации AR-модели предполагалось, что модель линейна по параметрам. В данном случае это означает, что величина коэффициента  $a_1$  не будет зависеть от амплитуды импульса (I фаза послесейсмического возмущения). Однако большинство реальных систем не являются линейными, но часто аппроксимируются таковыми, если отклонения от линейного характера реакции не являются значительными. Предпочтение линейной аппроксимации отдается еще и потому, что дифференциальные уравнения, описывающие поведение таких систем, в нелинейном случае трудно поддаются аналитическому решению, а часто вообще его не имеют. На рис. 4 представлена зависимость рассчитанных коэффициентов AR-моделей от амплитуды послесейсмических аномалий расхода воды источников. Как видно на рисунке, между амплитудой входного импульса и параметрами AR-моделей существует достаточно тесная корреляционная зависимость.

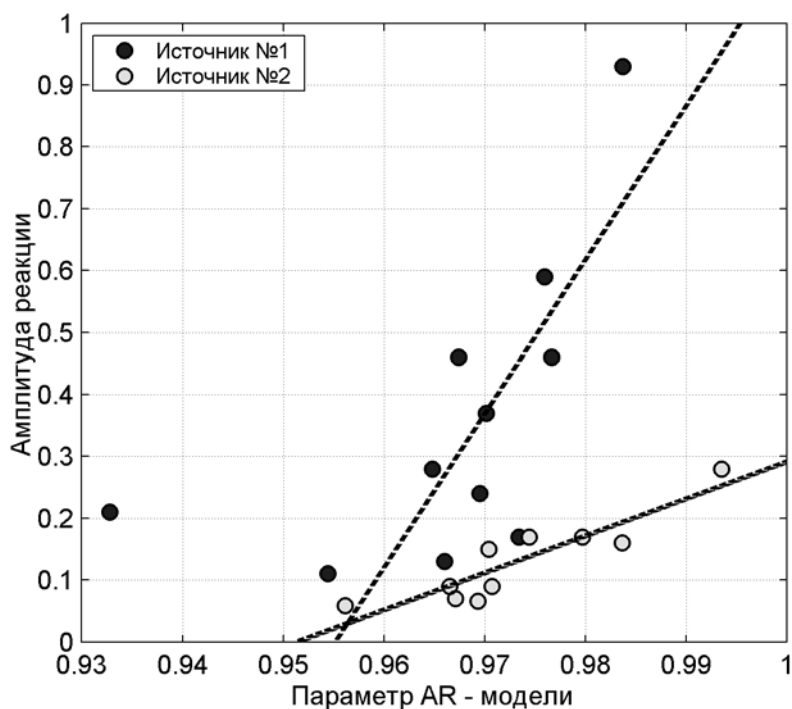


Рис. 4 Графики зависимости параметров AR-модели от амплитуды послесейсмического возмущения расхода воды Пиначевских источников.

Видно также, что эта зависимость, по крайней мере в рассматриваемом диапазоне амплитуд, носит линейный характер. Исключением является точка с координатами  $a_1 = 0.9328$ ,  $A = 0.21$  (источник № 1). Эта точка соответствует послесейсмической реакции на землетрясение 1.06.1998 г. Столь сильное отклонение значения параметра AR-модели в данном случае может являться следствием как минимум двух причин. Во-первых, это может быть связано с тем, что послесейсмическая реакция источника на это землетрясение расположена на «хвосте» более мощной послесейсмической аномалии, связанной с сильным землетрясением 5.12.1997 г.,  $K_s = 15.5$ . В этом случае параметры модели могут быть меньше из-за того, что гидродинамическая система еще не достигла спокойного, фоновому уровню режима. Во-вторых, относительно низкое значение параметра может быть связано с ошибкой оценивания, поскольку третья фаза послесейсмической реакции в случае слабых возмущений может сильно искажаться действием разного рода помехообразующих факторов. Вернемся к анализу рис. 4. Как уже упоминалось выше, параметры AR-моделей связаны с величиной амплитуды послесейсмических изменений линейной зависимостью. Известно, что любая зависимость параметров, характеризующих реакцию системы на входное воздействие от масштаба этого воздействия, указывает на то, что рассматриваемая система в принципе не линейна и, при определенных условиях, может терять устойчивость. Если рассматривать первую фазу послесейсмической реакции как функцию энергии землетрясения, то потеря устойчивости гидродинамических систем Пиначевских источников при катастрофических землетрясениях может проявляться в виде резкого изменения режима их функционирования. Примеры таких необратимых изменений в режиме подземных вод в случае сильнейших землетрясений достаточно многочисленны [5]. Из рис. 4 следуют еще несколько интересных выводов. Видно, что регрессионные прямые, аппроксимирующие зависимость коэффициентов AR-моделей от амплитуды возмущения, имеют точку пересечения. Это свидетельствует о том, что параметрически при малых возмущениях реакция гидродинамических систем первого и второго источников будет практически одинаковой. Далее, при увеличении амплитуды входного воздействия регрессионные прямые расходятся, причем угловой коэффициент прямой, построенной для расхода источника № 2, оказывается меньше, чем угловой коэффициент прямой, построенной для первого источника. Различный наклон регрессионных прямых в данном случае означает, что гидродинамические системы

первого и второго источника, несмотря на то, что их выходы расположены на расстоянии 15 м друг от друга, различаются. Это, по-видимому, является следствием неодинаковой степени смешения поверхностной и глубинной составляющих воды, дренируемой источниками. В пользу этого предположения свидетельствует и значение минерализации воды, которая, у источника № 2/1 в три раза выше, чем у источника № 1. Различный наклон регрессионных прямых также характеризует скорость потери устойчивости гидродинамических систем. Из рисунка следует, что гидродинамическая система второго источника менее устойчива, чем система первого источника. Если предположить, что линейный характер зависимости коэффициентов AR-моделей от величины входного импульса сохраняется и в области более значительных амплитуд, то можно оценить предельное значение амплитуды, при котором система «пласт-источник» будет терять устойчивость. Для источника № 1 такое значение амплитуды равно 1.12 л/сек, для второго источника – 0.3 л/сек. Здесь необходимо отметить, что приведенные оценки являются очень приблизительными, и могут существенно изменяться при появлении каждой новой точки в области больших амплитуд реакции.

### **Результаты анализа**

Наблюдения за режимом Пиначевских источников, которые проводятся с 1977 г., показывают, что сильные землетрясения инициируют мощные послесейсмические возмущения расхода воды, а также увеличение в ней содержания растворенного вещества и газа. Послесейсмические возмущения как гидродинамической, так и гидро-газохимической составляющих режима источников можно разделить на три фазы. Первая фаза изменения расхода воды характеризуется быстрым, импульсным его увеличением в результате воздействия на гидрогеодинамическую систему сейсмической волны. Наличие второй, переходной фазы, по-видимому, объясняется реакцией источников на афтершоки землетрясений. Третья фаза - фаза восстановления значений расхода, которое происходит по экспоненциальному закону.

В качестве модели, описывающей послесейсмические возмущения расхода воды, использовалась стохастическая модель авторегрессии первого порядка. Показано, что выбранная модель хорошо аппроксимирует фактические данные для каждой конкретной послесейсмической аномалии в отдельности. Общая же картина (результаты параметрической идентификации всех послесейсмических аномалий) демонстрирует зависимость параметров AR-моделей от амплитуды реакции. В терминах теории дифференциальных уравнений это будет означать, что коэффициенты при производных в этих уравнениях будут зависеть от искомой функции, что является признаком нелинейности и неустойчивости гидрогеодинамических систем Пиначевских источников. Анализ зависимости параметров AR-моделей от амплитуды послесейсмического изменения расхода воды источников позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, эта зависимость, по крайней мере в рассматриваемом диапазоне амплитуд, имеет линейный характер. Во-вторых, линии регрессии имеют общую точку. Это означает, что параметрически, при малых амплитудах возмущения, реакция источников на входное воздействие будет практически одинаковой. В-третьих, регрессионные прямые имеют разный угловой коэффициент, который, в данном случае будет характеризовать скорость потери устойчивости рассматриваемых систем. Разница в значениях углового коэффициента также свидетельствует о том, что гидродинамические системы первого и второго источников имеют различия. Эти различия, по-видимому, обусловлены разной степенью смешения пресных и термальных вод, дренируемых источниками.

### **Список литературы**

1. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.
2. Деч В.Н., Кноринг Л.Д. Методы изучения периодических явлений в геологии. Ленинград: Недра, 1985. 250 с.
3. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, Вып. 1. 1971. 316 с.



4. *Дьяконов В., Круглов В.* MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем // Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 448 с.
5. *Киссин И.Г.* Землетрясения и подземные воды. М.: Наука, 1982. 176 с.
6. *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. № 2. 1994. С. 53-71.
7. *Мышкис А.Д.* Элементы теории математических моделей. Едиториал УРСС. 2004. 191 с.
8. *Пейн Г.* Физика колебаний и волн. М.: Мир, 1979. 392 с.
9. *Поляк Б.Г., Вакин Е.А., Овчинникова Е.Н.* Гидрогеотермические условия вулканического района Камчатки. М.: Наука, 1965. 88 с.