

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РЕАКЦИИ РАСХОДА ПИНАЧЕВСКИХ ИСТОЧНИКОВ НА СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Рябинин Г. В., Хаткевич Ю. М.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
gena@emsd.iks.ru , khat@emsd.iks.ru*

Введение

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), слагающего 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 щебёнки андезиты. Следов гидротермальных изменений в андезитах не наблюдается [4]. Химический состав Пиначевских гидротерм формируется в результате смешения нисходящего потока пресных холодных вод и восходящего потока термальных вод [3]. В настоящее время наблюдения проводятся на четырёх 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 определяется рН, концентрации основных макрокомпонентов и кислот, концентрации растворённых в воде газов. Всего 21 параметр. Температура воды и воздуха измеряется срочным термометром. Атмосферное давление замеряется в мм рт. ст. барометром "М 67". Расход воды источников измеряется объёмным 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, магниево-натриевому типу. В составе растворённых газов преобладает метан. Химический состав воды источника № 3 – хлоридно-гидрокарбонатный, магниево-натриевый. В составе газов преобладает азот. Средняя минерализация воды источников № 1, № 2/1, № 2/2, № 3 составляет, соответственно, 0.3, 1.0, 0.9, 0.1 мг/л. 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 графики изменения расхода воды источников №1 и № 2/1 в сопоставлении с сейсмичностью. Постсейсмические изменения расхода источников можно условно разделить на три фазы. На первой – косейсмической 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 расстояние $S = 155$ 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.



Рис. 1. Графики изменения расходов воды источников №1 и №2/1 в сопоставлении с сейсмичностью. Жирными вертикальными линиями на третьей и четвертой диаграммах обозначены моменты землетрясений, вызвавших anomальные постсейсмические изменения расхода воды

Анализ реакции расхода источников на сильные землетрясения

Перед тем как перейти непосредственно к анализу, необходимо сказать несколько слов о предварительной подготовке данных, а именно, о способе выделения постсейсмических аномалий из фоновых вариаций. 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 постсейсмической реакции. Затем, по значениям дифференцированных рядов оценивались доверительные интервалы равные $\mu \pm 3\sigma$, где: μ - среднее значение, σ - среднеквадратическое

Таблица 1. Краткая характеристика землетрясений и амплитуд косейсмических возмущений расхода Пиначевских источников

Дата	Ks	Δ , км	A_{01} , л/с	A_{02} , л/с
23.01.80	13.7	183	0.17	-
06.10.87	14.1	134	0.37	-
01.03.90	13.5	121	0.11	-
02.03.92	14.6	137	0.59	0.160
08.06.93	15.0	246	0.46	0.170
13.11.93	14.6	179	0.46	0.150
01.01.96	14.3	87	0.24	0.170
21.06.96	13.9	249	0.13	0.090
05.12.97	15.5	304	0.93	0.280
01.06.98	13.8	145	0.21	0.070
03.06.00	13.1	177	-	0.059
20.12.00	13.0	109	-	0.066
08.10.01	14.1	163	0.28	0.090

Ks – энергетический класс землетрясений, Δ - эпицентральное расстояние, $A_{01,2}$ – амплитуда косейсмического возмущения расхода воды источников № 1 и № 2/1.

отклонение. Те значения, которые выходили за пределы верхней границы доверительного интервала считались аномальными. Все, выделенные таким образом вариации, соответствовали наиболее сильным сейсмическим событиям, произошедшим за рассматриваемый период (1977 – 2005 гг.) (таблица 1).

Анализ аномальных изменений расхода Пиначевских источников, инициированных сильными сейсмическими событиями, начнем с рассмотрения первой – косейсмической фазы реакции. Здесь нас, главным образом, будет интересовать амплитуда реакции и её связь с параметрами землетрясений, такими как энергия (или ее логарифм) и расстояние от эпицентра до пункта наблюдения. Ранее выполненные оценки [2, 8] показывают, что корреляционная связь между описанными параметрами действительно существует. Попытка очередной оценки вызвана тем, что в работе [8] рассматривалась корреляция амплитуды аномалии с энергетическим классом землетрясения без учёта эпицентрального расстояния, а в работе [2] оценка проводилась по ограниченной выборке данных наблюдений (1977 - 1995 гг.). Зависимость между рассматриваемыми параметрами искалась, так же как и в работе [2], в виде хорошо известного макросейсмического уравнения [7],

$$A_{QP} = b_1 + b_2(Ks) + b_3 \lg(R) \quad (1)$$

где A_{QP} – расчетная амплитуда косейсмической реакции расхода воды, Ks – энергетический класс землетрясений, R – эпицентральное расстояние, b_1 , b_2 и b_3 – коэффициенты регрессионной модели, определяемые методом наименьших квадратов. На рисунке 2 представлены графики, иллюстрирующие соответствие расчетных (A_{QP}) и наблюдаемых (A_{QH}) амплитуд косейсмической реакции расхода источников на сильные сейсмические события, а в таблице 2 сведены результаты регрессионного анализа. Из рисунка видно, что между расчетными и наблюдаемыми значениями

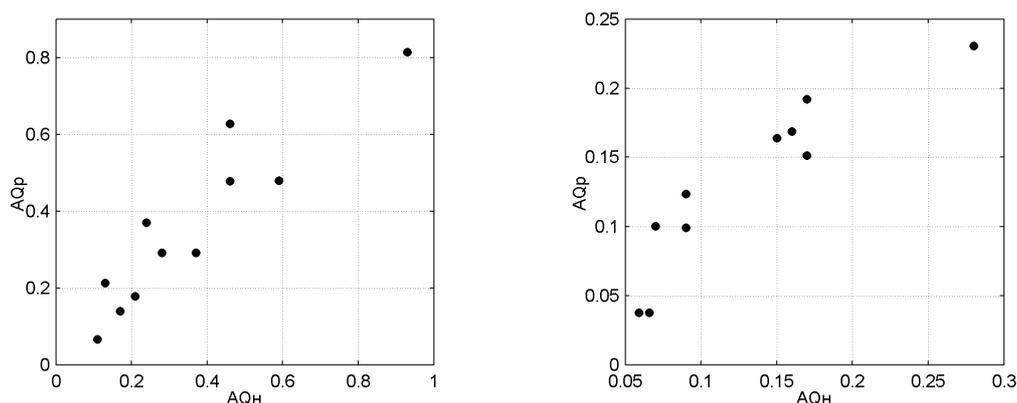


Рис. 2 Графики зависимости между наблюдаемыми значениями амплитуды косейсмической фазы реакции A_{QH} и расчётными значениями A_{QP} , построенные для первого (слева) и второго (справа) источников.

амплитуды косейсмической реакции обнаруживается хорошее соответствие. В пользу этого свидетельствуют и достаточно высокие коэффициенты детерминированности (см. табл. 2). Однако можно так же заметить, что точки на графиках не ложатся на прямую линию, как это должно быть в случае, когда расчетная модель в полной мере соответствует фактическим данным. Особенно это заметно на графике, построенном для источника № 2/1, в области малых амплитуд реакции. Таким образом, использование данного эмпирического соотношения может быть оправдано, только с

Таблица 2. Результаты регрессионной оценки коэффициентов уравнения (1)

	b1	b2	b3	R2	α	v1	v2	Fp	Fкр
Источник №1	-4.99	0.38	-0.01	0.85	0.05	3	8	23.08	4.07
Источник №2/1	-0.98	0.08	-0.04	0.84	0.05	3	7	18.22	4.35

b_1 , b_2 , b_3 – коэффициенты уравнения (1); R_2 – коэффициент детерминированности; α – уровень значимости; v_1 , v_2 – параметры распределения Фишера; F_p – расчётное значение критерия Фишера; $F_{кр}$ – критическое значение критерия Фишера.

точки зрения самых общих рассуждений, относительно наличия или отсутствия корреляционной связи между рассматриваемыми параметрами. Для построения более точной зависимости необходимо располагать большим количеством точек в области больших амплитуд реакции.

Вторая фаза постсейсмической реакции, как было описано выше, наблюдается не во всех случаях. Даже если принять во внимание тот факт, что в отдельных случаях вторую фазу не удастся зафиксировать по причине низкой дискретности опробования, вряд ли она достойна персонального анализа, поскольку является либо показателем наличия в системе инерционных процессов, либо значительно менее выраженной реакцией на афтершоки главного толчка [5].

Третья фаза постсейсмической реакции представляет наибольший интерес, так как является непосредственно характеристикой системы "источник – пласт". В работе [5] было предложено рассматривать третью фазу постсейсмической реакции, как импульсную характеристику гидродинамической системы, которая с хорошим приближением описывается дифференциальным уравнением первого порядка. В этой же работе выполнена параметрическая идентификация стохастического аналога этого дифференциального уравнения – уравнения авторегрессии первого порядка. Анализ результатов параметрической идентификации показал наличие зависимости параметров стохастической модели от амплитуды импульса – амплитуды косейсмической фазы реакции. На основании этого сделан вывод о том, что гидродинамические системы Пиначевских источников обладают нелинейной реакцией на входное воздействие и при определённых условиях могут терять устойчивость, что может проявляться в виде необратимых изменений режима. Как выяснилось впоследствии, вышеприведённые положения нуждаются в дополнительной аргументации. В связи с этим, в данной работе мы попытались провести ту же оценку, но несколько иным образом. Главное отличие заключалось в том, что для аппроксимации третьей фазы постсейсмической реакции использовалась функция, непосредственно являющаяся решением дифференциального уравнения первого порядка.

$$Q(t) = A_0 e^{-Kt} \quad (2)$$

Здесь $Q(t)$ – изменение расхода источника на стадии восстановления (третья фаза), A_0 – амплитуда косейсмической реакции (первая фаза), t – время, K – коэффициент дифференциального уравнения первого порядка. Оценка коэффициента K осуществлялась методом наименьших квадратов. После того, как были определены коэффициенты (K) для всех постсейсмических вариаций, их значения, а так же величины амплитуд косейсмической реакции расхода воды наносились на график в координатах $-K : A_0$. Построенные таким образом графики изображены на рисунке 3. Из рисунка видна явная зависимость между оцениваемым коэффициентом и амплитудой косейсмической реакции расхода воды. При этом заметно, что ошибка оценивания коэффициента K в области малых амплитуд

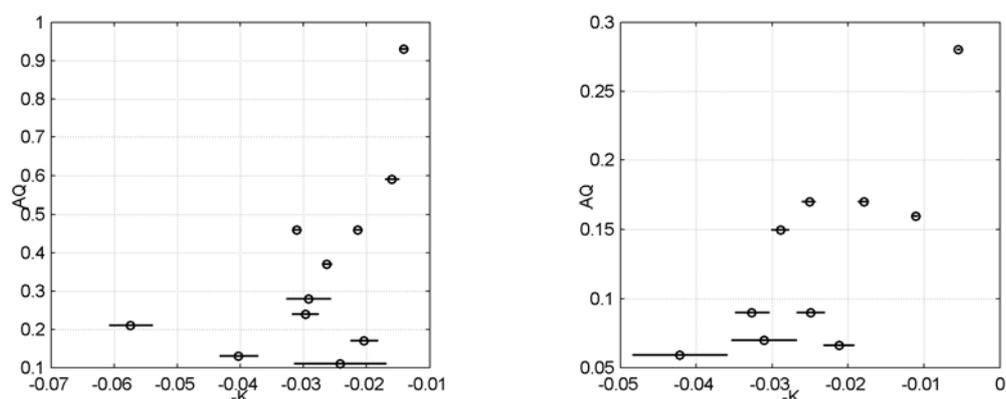


Рис. 3 Графики зависимости между коэффициентом K уравнения (2) и амплитудой постсейсмической аномалии расхода воды A_0 , построенные для первого (слева) и второго (справа) источников. "Усами" на диаграммах изображены верхний и нижний пределы ошибки определения коэффициентов K .

косейсмической реакции возрастает. Если принять априори, что дисперсия случайной составляющей практически не меняется на всём анализируемом интервале, то увеличение ошибки оценивания естественным образом объясняется уменьшением соотношения сигнал – шум в тех случаях, когда амплитуда постсейсмической аномалии не столь велика. Если попытаться определить минимальное значение амплитуды, выше которого можно ожидать сравнительно

надёжные оценки коэффициента K , то для источника №1 это значение будет равно 0.3 л/с, для источника № 2/1 – 0.1 л/с. К сожалению, то количество точек на графике (рис. 3), для которых оценку коэффициента K можно считать достаточно надёжной, не позволяют судить о форме зависимости. Остаётся возможным лишь констатировать, что реакция системы "пласт – источник" на входное воздействие пропорциональна величине этого воздействия без указания закона пропорциональности. Тем не менее, есть надежда на то, что с появлением новых данных проблему вида пропорциональности удастся решить. Это может иметь большое значение для оценки так называемого максимального воздействия, после которого возможно необратимое изменение режима источников.

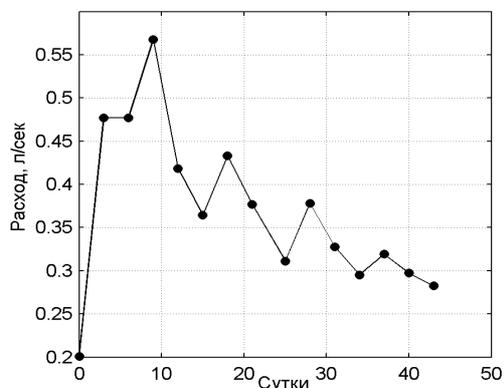


Рис. 4 Изменение расхода источника №1 в связи с землетрясением 8/10/2001 г.

было выполнить спектральный анализ на предмет наличия периодических флуктуаций в остатках,

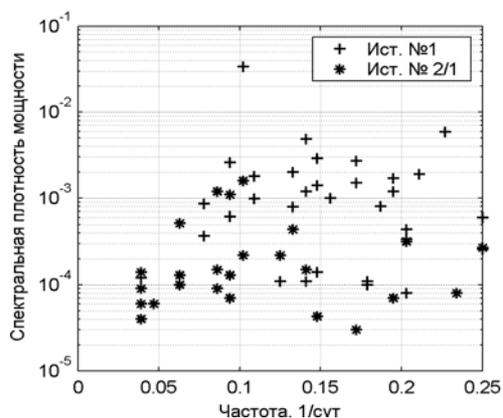


Рис. 5 Зависимость спектральной плотности от частоты, рассчитанная для остатков аппроксимации третьей фазы постсейсмических аномалий расхода Пиначевских источников

землетрясением 8.10.2001 г., вряд ли являются случайными. В качестве возможной причины, по которой подобная "гармония" не наблюдается в других случаях, можно назвать низкую дискретность опробования источников.

Обсуждение результатов

Наблюдения за режимом Пиначевских источников, которые проводятся с 1977 г. показывают, что сильные землетрясения инициируют мощные постсейсмические возмущения расхода воды, а также увеличение в ней содержания растворённого вещества и газа. Реакцию расхода воды источников на сейсмическое воздействие можно условно разделить на три фазы. Если рассматривать первую - косейсмическую фазу реакции как импульс, то третья фаза – фаза релаксации будет являться импульсной характеристикой гидродинамической системы источников. В отличие от скважины, параметры которой в той или иной степени известны (имеется в виду:

представляет собой суперпозицию экспоненциального затухания и периодических осцилляций уменьшающейся амплитуды. Естественным желанием, в связи с этим случаем, для всех анализируемых постсейсмических аномалий. Спектральный анализ осуществлялся методом Берга, который имеет высокую разрешающую способность при анализе коротких реализаций [6]. После расчёта спектров для каждого ряда остатков, по возможности, выбирались три наиболее значимых спектральных пика, значения частоты и мощности которых наносились на соответствующую координатную плоскость. Результаты анализа представлены на рисунке 5. К сожалению, предположение о том, что остатки аппроксимации являются некой суперпозицией случайного шума и гармонической компоненты (или нескольких гармоник), исходя из анализа графика, нельзя считать доказанным. Во всяком случае, из рисунка не видно, чтобы максимальные значения спектральных пиков тяготели к какой-то определённой частоте или же образовывали кластеры. С другой стороны, столь очевидные периодические колебания расхода воды на стадии релаксации, наблюдаемые нами в связи с

геологический разрез, характеристики самой скважины, а так же дренируемого ею водоносного пласта), гидродинамическую систему источника вполне можно рассматривать, как систему типа "черный ящик". Возможность изучения таких систем, как правило, сводится к анализу их реакции на входной сигнал заданного вида (импульс, ступенчатый сигнал, периодические колебания и т. д.). В этом смысле, наблюдения за реакцией источника на сейсмическое воздействие являются едва ли не единственной возможностью изучения его гидродинамической системы. К примеру, при исследовании воздействия землетрясений на уровень воды в скважинах чаще всего выделяют два режима движения уровня: затухающие колебания около начального положения равновесия и аperiodический режим восстановления. Более детальный теоретический анализ задачи предусматривает возможность существования и других типов движения уровня, к которым, в частности, относится суперпозиция затухающих колебаний и режима аperiodического восстановления [1]. Таким образом, структура математической модели изучаемой гидродинамической системы, построение которой является конечной целью исследований, будет зависеть как от общего вида импульсной характеристики (затухающие колебания, экспоненциальное восстановление и т. д.), так и от особенностей, анализу которых и была посвящена данная работа. Из них, в первую очередь хотелось бы выделить зависимость параметра, характеризующего стадию восстановления расхода воды источников от амплитуды сейсмической реакции. Если использовать аналогии с опытно-фильтрационными работами, то сейсмическую реакцию можно рассматривать, как мгновенную откачку или выпуск достаточно большого объема воды из скважины. Тогда указанная зависимость параметров восстановления системы от величины воздействия, будет свидетельствовать об изменении во времени характеристик самого водоносного пласта, к примеру, его водопроницаемости. В случае с Пиначевскими источниками, которые являют собой результат смешения вод различного состава, подобные нестационарные эффекты, по-видимому, связаны с изменением во времени соотношения характеристик, дренируемых источниками водонапорных комплексов.

Список литературы

1. Башмаков В. И., Боровский Л. В., Вартамян Г. С., и др. Исследование водоносных горизонтов методом колебаний // Водные ресурсы. 1986. №2 . С. 31-39.
2. Копылова Г. Н., Воропаев П. В. Отклик режимного источника на землетрясения как индикатор состояния его подземной водоносной системы // Вулканология и сейсмология. 2005. №2. С. 32-45.
3. 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. 53-70.
4. Поляк Б. Г., Вакин Е. А., Овчинников Е. Н. Гидрогеохимические условия вулканического района Камчатки. М.: Наука, 1965. 96 с.
5. Рябинин Г. В., Хаткевич Ю. М. Стохастическая модель реакции подземных вод а сейсмическое воздействие (на примере Пиначевских источников на Камчатке) // Материалы ежегодной конференции посвящённой дню вулканолога. Петропавловск – Камчатский. 2005. С. 153-160.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
7. Шебалин Н. В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 95 – 111.
8. Ryabinin G.V., Khatkevich Yu.M. Underground water response to seismic activity in case of Pinachevo springs, Kamchatka // Agenda of the IV International Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka- Aleutian Arcs. Linkages among tectonics, seismicity, magma genesis and eruption in volcanic arcs. Petropavlovsk- Kamchatsky, august 21-27. 2004. P. 289-290.