

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ИСТОЧНИКОВ И СКВАЖИН

Воропаев П.В.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, chicoli@emsd.ru

Введение

В результате режимных наблюдений на самоизливающихся скважинах и источниках в сейсмоактивных районах обнаружены предшествующие и сопутствующие землетрясениям изменения дебитов, температуры, химического и газового состава подземных вод [3-6, 8]. Среди таких изменений можно выделить два типа гидрогеосейсмических аномалий: 1 - связанные с изменением порового давления и разгрузки подземных вод (гидрогеодинамические) и 2 - связанные с изменением физико-химических показателей подземных вод: минерализации и концентраций растворенных минеральных и газовых компонентов химического состава воды (гидрогеохимические), а также температуры воды.

Большая часть гидрогеосейсмических аномалий в режиме самоизливающихся скважин и источников проявляется в течение некоторого времени после землетрясений (рис. 1). Дебит, как правило, резко увеличивается, достигая максимального значения в течение нескольких часов после землетрясения, затем плавно уменьшается до первоначального уровня (рис. 1а). Физико-химические показатели достигают экстремальных значений в течение суток-десяток суток после землетрясения, затем плавно возвращаются к начальным значениям (рис. 1а, б).

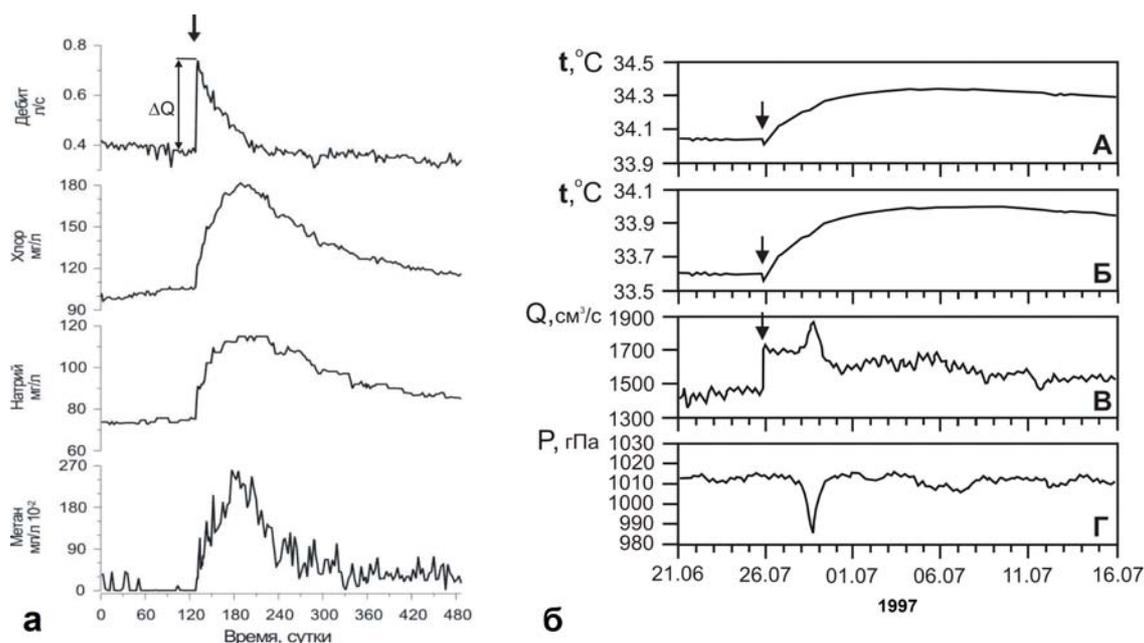


Рис. 1. Постсейсмические изменения в режиме источников: а - изменение параметров режима Пиначевского источника 1, Камчатка, после землетрясения 6.10.1987 г., $M=6.6$, $R=135$ км (показано стрелкой); период наблюдений с 1.06.1987 по 29.09.1988 гг. [4]; б - изменения температуры воды и дебита источника Юдани, Япония: А, Б – изменение температуры на глубинах 2.1 и 24 м соответственно; В – дебит источника; Г – вариации атмосферного давления; t - температура воды, Q – дебит, P – атмосферное давление; стрелками обозначено землетрясение 25.06.1997 г., $M=6.3$, $R=251$ км [5].

Необходимо отметить гидрогеохимические аномалии, которые возникают в период, предшествующий землетрясениям, и могут иметь прогностический характер. Такие аномалии были выявлены в режиме скважин и источников, расположенных на территории США, Японии, России (Петропавловский полигон, Камчатка), Таджикистана (Душанбинский полигон), Узбекистана (Ташкентский геодинамический полигон) [1, 3, 6-7]. Такие аномалии проявляются в изменении микро- и макрокомпонентов химического состава подземных вод серией пиков или имеют бухтообразный вид [1].

Механизмы формирования гидрогеосейсмических аномалий

Для объяснения аномалий химического состава подземных вод при сейсмических воздействиях привлекаются следующие механизмы: 1) увеличение растворимости минерального скелета при повышении флюидного давления, следствием которого является рост концентраций компонентов химического состава подземных вод; 2) поступление в водоносный горизонт флюидов при разрушении пор; 3) смешение вод ранее изолированных водоносных горизонтов и подток глубинных флюидов [7].

Считается [7], что предсейсмическое увеличение концентраций компонентов химического состава подземных вод, в случае действия первого механизма, происходит следующим образом. Рост напряжений в земной коре может вызвать увеличение флюидного давления и повышение растворимости минерального скелета. В результате происходит рост концентраций минеральных компонентов в подземных водах. Однако, экспериментальные исследования показали, что для значительного увеличения растворимости минерального скелета необходимо, чтобы рост давления составлял десятки-сотни бар [7]. Это не согласовывается с реальными величинами роста флюидного давления при подготовке землетрясений (не более первых бар) [7]. Поэтому этот механизм не позволяет объяснить большую часть гидрогеосейсмических аномалий в изменениях химического состава подземных вод.

Вопрос о влиянии механизма поступления в подземные воды поровых флюидов на величину гидрогеохимических аномалий до настоящего времени остается открытым. Данный механизм основывается на предположении о том, что в период подготовки землетрясения или при прохождении сейсмических волн происходит деформация водовмещающей породы и поступление в водоносный горизонт поровых флюидов, концентрация и химический состав которых отличаются от состава подземных вод. Лабораторные эксперименты по нагружению образцов горных пород показали, что в случае высоких нагрузок происходит схлопывание пор образца и выделение из них воды с высокими концентрациями минеральных и газовых компонентов [2]. Было также показано [2], что при небольшом нагружении образцов горных пород происходит незначительное уменьшение их объема без разрушения пор. Отсюда следует, что поступление дополнительных минеральных и газовых компонентов в подземные воды за счет поровых флюидов может происходить только при высоких нагрузках, когда происходят необратимые изменения в породе и, как следствие, такой механизм не позволяет объяснить регулярные гидрогеохимические аномалии в режиме подземных вод. Предполагается [7], что подобный механизм может оказывать существенное влияние на формирование гидрогеохимических аномалий в режиме подземных вод и газов только при подготовке и реализации сильных землетрясений в области очага.

Наиболее часто для объяснения гидрогеохимических аномалий привлекается механизм смешивания вод относительно изолированных водоносных горизонтов, либо увеличение подтока глубинных флюидов [4, 5, 8]. На стадиях подготовки и реализации землетрясений происходит изменение напряженно-деформированного состояния водовмещающих горных пород, развитие в них трещинной дилатансии и резкое изменение флюидного давления. Совокупность этих процессов обеспечивает возможность изменения условий смешивания контрастных по физико-химическим свойствам подземных вод, содержащихся в различных фрагментах водоносных систем, контролируемых самоизливающимися скважинами или источниками [4, 5]. Вследствие такого смешивания в относительно глубинных условиях и последующей разгрузки подземных вод с аномальным химическим и газовым составом формируются гидрогеохимические аномалии в режиме самоизливающихся скважин и источников. Привлечение такого механизма для объяснения гидрогеохимических аномалий предполагает сложное строение питающих скважину или источник водоносных систем, состоящих из нескольких гидравлически связанных водоносных слоев, содержащих контрастные по физико-химическим свойствам подземные воды.

Моделирование гидрогеосейсмических аномалий

Для объяснения регулярных постсейсмических аномалий химического состава воды Пиначевских источников (Камчатка), выполнено моделирование смешивания двух контрастных по химическому составу флюидов в водоносной системе с использованием модели [8]. Модель описывает процесс смешивания двух контрастных по минерализации вод в зоне повышенной водопроницаемости в стационарных условиях и при воздействии землетрясений. В качестве параметра, характеризующего процесс смешивания, принята концентрация хлора, как наиболее

представительного и надежно определяемого компонента химического состава термальной воды Пиначевских источников.

Данные гидрогеологического опробования глубокой скважины ГК-1, находящейся в 100 м от Пиначевского источника 1 [3], и материалы многолетних режимных наблюдений КОМСП ГС РАН в 1977 – 1995 гг. позволяют предложить следующую схему гидрогеологических условий в водоносной системе Пиначевских источников (рис. 2А). Полагалось, что в районе источников имеется восходящий поток термальных вод, в котором температура, минерализация воды и концентрация газа уменьшаются с приближением к поверхности земли. Поэтому для каждой глубины Z_n можно принять некоторую фоновую величину концентрации хлора Cl_n^n в воде (рис. 2А).

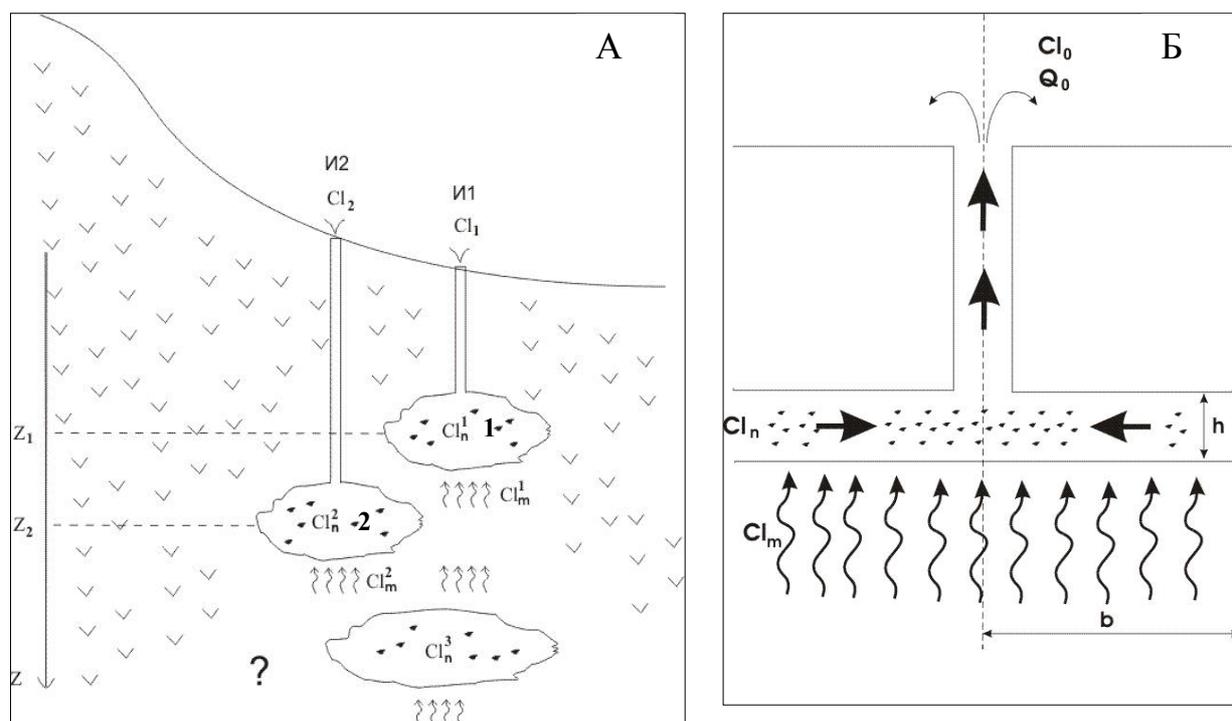


Рис. 2. А - Схема водоносной системы Пиначевских источников: И1- источник 1, И2 - источник 2; Z_1, Z_2 - глубины, соответствующие зонам повышенной водопроницаемости (зонам смешивания) 1 и 2; Cl_n^1, Cl_n^2 - концентрации хлора в подземной воде на глубинах Z_1 и Z_2 ($Cl_n^1 < Cl_m^2$); Cl_m^1, Cl_m^2 - концентрации хлора в минерализованной воде, поступающей в зоны смешивания 1 и 2 ($Cl_m^1 < Cl_m^2$); Cl_1, Cl_2 - концентрации хлора в воде источников 1 и 2 ($Cl_1 < Cl_2$); Б - модель смешивания двух вод в водоносной системе источника 1: h - мощность и b - радиус зоны повышенной водопроницаемости.

Источники 1 и 2 выводят на поверхность воды с концентрациями хлора Cl_1 и Cl_2 , образовавшиеся в результате смешивания одной воды с фоновой концентрацией хлора Cl_n и второй, более минерализованной воды, с концентрацией Cl_m . Концентрация хлора в воде источника 2 превышает в 2.5-3 раза концентрацию хлора в воде источника 1, поэтому величины Cl_n и Cl_m для источника 2 больше соответствующих величин для источника 1.

Если принять линейный характер смешивания двух вод и пренебречь временем смешивания, то для каждого источника выполняется равенство: $Cl = nCl_n + mCl_m$, и $n + m = 1$, $Cl_n < Cl < Cl_m$, где Cl – концентрация хлора в воде источника (концентрация смешанной воды); Cl_n – концентрация хлора, соответствующая глубине зоны смешения (зоны повышенной водопроницаемости); n – доля воды с концентрацией Cl_n в смешанной воде; Cl_m – концентрация хлора в минерализованном флюиде; m – доля воды с концентрацией Cl_m в смешанной воде.

Для источника 1 величина концентрации Cl_1 изменяется от 60 до 330 мг/л. Отсюда следует, что величина $Cl_n^1 < 60$ мг/л. Величину Cl_m^1 можно оценить по максимальным концентрациям хлора после землетрясений $Cl_{mi} > 330$ мг/л. Для источника 2 $Cl_n^2 < 320$ мг/л, а $Cl_m^2 > 355-500$ мг/л.

Схема гидрогеологических условий в водоносных системах источников 1 и 2 представлена на рис. 2Б. Основной областью питания каждого источника является зона повышенной водопроницаемости (макротрещиноватости), которая связана с поверхностью непроницаемым

каналом и симметрична относительно него. В районе Пиначевских источников существует вертикальный поток термальной воды с повышенной концентрацией, которая, достигая зон повышенной макротрещиноватости, смешивается с находящейся в ней слабоминерализованной водой. При этом количество поступающей в зону смешивания минерализованной воды увеличивается с приближением к каналу источника. Это обусловлено локальным понижением флюидного давления вблизи канала вследствие постоянной разгрузки источника. Полученная смесь движется по каналу источника и изливается на поверхность.

В работе [4] приводятся зависимости, характеризующие постсейсмические гидрогеохимические аномалии для стационарных и возмущенных состояний водоносной системы источника 1. При этом динамика постсейсмического изменения концентрации хлора описывается следующим выражением:

$$\delta\sigma(t) = \delta\sigma_0 \frac{e^{-t/t_0} - e^{-t/\tau_0}}{(1 - \tau_0/t_0)\beta(\tau_0, t_0)}, \quad (1)$$

где $\delta\sigma_0$ - максимальная амплитуда постсейсмического повышения концентрации хлора;

$\beta(\tau_0, t_0) = (\tau_0/t_0)^{t_0/\tau_0}$ - нормализованный коэффициент функции времени; t - время с момента землетрясения, t_0 - характерное время релаксации флюидного давления в водоносной системе; $\tau_0 = (\pi b^2 h)/(nQ_0)$ - параметр, характеризующий время перемещения потока через область смешивания и определяющий форму постсейсмической аномалии в изменении концентрации хлора; Q_0 - дебит источника до возмущения, h - мощность зоны повышенной водопродовимости, b - радиус зоны повышенной водопродовимости.

Постсейсмическое уменьшение дебита источника определяется релаксацией флюидного давления в водоносной системе и описывается экспоненциальной функцией:

$$\delta Q(t) = \delta Q_0 e^{-t/t_0} \quad (2)$$

где δQ_0 - амплитуда косейсмического увеличения дебита.

В работе [4] приводятся результаты моделирования шести ярко выраженных постсейсмических аномалий в изменении дебита и концентрации хлора в воде источника 1. Изменения этих параметров после пяти землетрясений хорошо описываются модельными зависимостями. Для наиболее сильного землетрясения 2 марта 1992 г. результат моделирования получился хуже, т. к. не удалось подобрать параметры t_0 и τ_0 , которые бы удовлетворительно описывали восходящую ветвь повышения концентрации хлора. В случае этого события модельное поведение дебита также значительно отличается от фактического в течение первых десятков суток после землетрясения. Следует отметить, что данное землетрясение оказало наиболее сильное влияние на водоносную систему Пиначевских источников, и в этом случае необходимо расширить модельные представления о процессах в водоносной системе.

Для всех землетрясений, вызвавших увеличение дебита источника 1 [4], был оценен параметр t_0 . На рис. 3 представлена зависимость величины t_0 от интенсивности сейсмического воздействия $M/\lg R$ (параметр интенсивности, выраженный как частное M и $\lg R$, предложен Г.Н. Копыловой). Видно, что время релаксации давления в водоносной системе t_0 растет с увеличением интенсивности сейсмического воздействия $M/\lg R$.

Заклучение

Представленная модель иллюстрирует роль механизма смешивания вод относительно изолированных водоносных горизонтов и подтока глубинных флюидов в формировании постсейсмических аномалий химического состава воды Пиначевского источника 1. Данная модель объясняет большую часть постсейсмических аномалий химического состава воды в режиме этого источника.

В модели количественно не определены: 1 - механизм воздействия сейсмических волн на водоносную систему источника и 2 - механизм увеличения потока минерализованной воды в зону повышенной водопродовимости (зону смешивания) при переходе водоносной системы в

возмущенное состояние. Модель также не объясняет относительный рост флюидного давления в водоносной системе с глубиной при сейсмическом воздействии. Такое объяснение находится, если

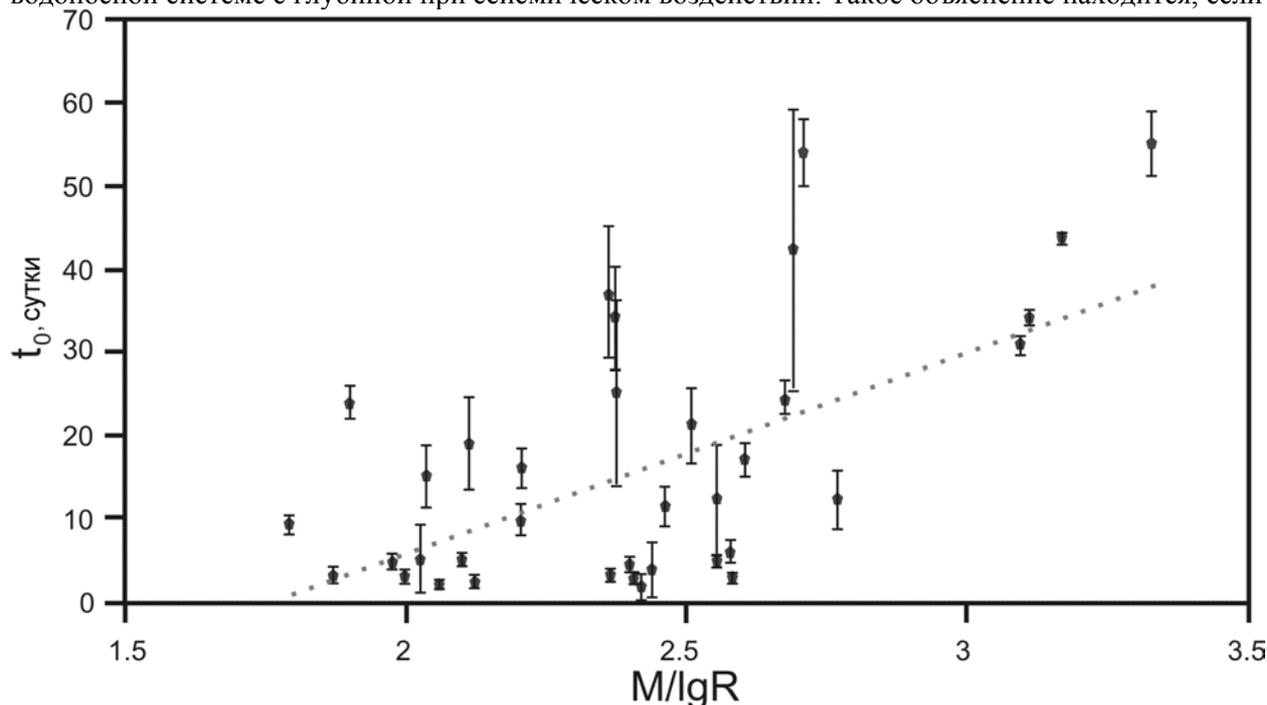


Рис. 3. Зависимость параметра модели t_0 от интенсивности сейсмического воздействия на водоносную систему источника $M/\lg R$, где M – магнитуда землетрясения, R – гипоцентрального расстояния в км.

предположить, что импульсное изменение давления обусловлено, в основном, выделением свободного газа, концентрация которого в водоносной системе увеличивается с глубиной [4], а также происходит увеличение проницаемости водовмещающих пород по отношению к восходящему потоку минерализованного флюида.

Обнаружена прямая зависимость времени релаксации флюидного давления t_0 от интенсивности сейсмического воздействия $M/\lg R$, которая показывает, что при возникновении относительно сильных землетрясений на небольшом гипоцентрального расстоянии период времени возмущенного стояния водоносной системы источника увеличивается. При этом величина t_0 может изменяться от первых суток до десятков суток.

Список литературы

1. Барсуков В. Л., Варшал Г. М., Гаранин А. В., Замокина Н. С. Значение гидрогеохимических методов для краткосрочного прогноза землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 3-16.
2. Варшал Г. М., Соболев Г. А., Барсуков В. Л., Кольцов А. В., Костин Б. И. и др. Изучение закономерностей выделения летучих компонентов из пород при их нагружении в связи с проблемой прогноза землетрясений гидрогеохимическими методами // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 49-62.
3. Гриц Г.Н. Роль геодинамических факторов в формировании режима гидротерм на примере Пиначевских источников (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 30-37.
4. Копылова Г.Н., Воропаев П.В. Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 42-49.
5. Kitagawa Y., Koizumi N. A study on the mechanism of coseismic groundwater changes: Interpretation by a groundwater model composed of multiple aquifers with different strain responses // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № B8. P. 19121-19134.
6. Roeloffs E.A. Hydrologic precursors to earthquakes: a review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. № 2-4. P. 177-209.
7. Thomas D. Geochemical precursors to seismic activity // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. № 2-4. P. 241-266.
8. Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. Modelling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int. 2004. V. 157. P. 717-726.