

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИНЫ ГК-17)

Рябинин Г.В., Наумов А.В.

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

Введение

Изменения химического состава подземных вод в сейсмически активных областях рассматривается как один из возможных прогностических признаков сильных тектонических землетрясений. Несмотря на большое количество сведений о проявлении гидрогеохимических эффектов перед сильными сейсмическими событиями, механизмы возникновения этих эффектов изучены еще довольно слабо. Отсутствие прогресса в этой области в немалой степени связано с тем, что в сейсмологии до сих пор нет общепризнанной теории подготовки землетрясения, учитывающей феномен предвестников, хотя попытки построения такой теории предпринимаются [3].

Рассмотрим проблему с позиции самой общей схемы: факторы (действующие силы) → процессы → обстановки (конкретные природные условия). Подготовка землетрясения (фактор) инициирует процессы, которые протекают на фоне конкретных природных условий и вызывают проявление эффектов-предвестников. Из этой простой схемы становится понятно, что отсутствие единых представлений о природе действующего фактора (подготовке землетрясения), мягко говоря, не способствует пониманию генезиса предвестниковых эффектов. Использование же в качестве отправной точки исследований одной из существующих моделей, задает, в рамках рассматриваемой схемы, вполне определенную цепочку причинно-следственных связей, которые будут отражать реальность в той же мере, что и используемая модель. Такая ситуация делает актуальным рассмотрение «обратных задач», связанных с установлением природы действующего фактора на основе понимания процессов, протекающих в конкретных природных условиях и потенциально способных определять проявление эффектов - предвестников сильных землетрясений. Представленная работа является маленьким шагом в этом направлении.

Методика исследований

Работа задумывалась как раз с тем, чтобы постараться понять, какие именно процессы потенциально могут определять возникновение гидрогеохимических эффектов. Для этого на скважине ГК-17 была проведена серия экспериментов. Суть этих экспериментов, в общем смысле, заключалась в организации контролируемого воздействия на систему "пласт-скважина" с последующим наблюдением и анализом ее реакции. Под контролируемым воздействием, в данном случае, понималась инициация нестационарного режима фильтрации посредством изменения расхода воды скважины на ее устье. Реакция системы контролировалась периодическими измерениями расхода и температуры воды на устье скважины и отбором проб воды для последующего их количественного химического анализа в лабораторных условиях.

Скважина ГК-17 расположена в пределах Карымшинского участка Верхне-Паратунского месторождения термальных вод. Скважина пробурена в 1972 г. до глубины 1196 м и обсажена до глубины 162 м. По окончании бурения температура воды на забое скважины составила 88°C, на устье – 47°C. Геологический разрез по скважине ниже обсадных труб представлен, главным образом, вулканогенно-осадочными породами палеогенового возраста. Породы повсеместно трещиноватые, участками раздробленные. Практически по всему разрезу проявлены процессы хлоритизации, пропилитизации и пиритизации. Вода на устье скважины имеет хлоридно-сульфатный кальциево-натриевый состав. В составе растворенных в воде газов преобладает азот. Выбор скважины ГК-17 в качестве объекта исследований обусловлен, главным образом, относительно хорошим состоянием ее устьевого оборудования, которое было заменено в 2006 г.

Всего на скважине ГК-17 было выполнено три цикла измерений: в августе и сентябре 2014 г. и в июле 2015 г. Каждый цикл измерений осуществлялся по одной и той же схеме. Примерно за сутки до начала измерений на скважине устанавливался низкий дебит самоизлива порядка 0.2 л/сек. Спустя сутки устанавливался более высокий дебит порядка 0.5 – 0.6 л/сек. Сразу после этого, со скважины отбиралась проба воды и осуществлялся замер ее температуры. Далее, в течение часа, через каждые 10 минут проводились замеры температуры и расхода воды скважины. Последующие замеры расхода

и температуры воды, равно как и отбор проб, проводились один раз в два часа в течение светлого времени суток. Пробы воды доставлялись в лабораторию, а их количественный химический анализ (КХА) проводился не позднее двух суток с момента отбора.

Результаты всех трех экспериментов на скважине ГК-17 оказались примерно одинаковыми. Дебит скважины, после скачкообразного увеличения, практически не менялся, демонстрируя, однако, нечеткую тенденцию к уменьшению. Температура воды скважины всегда возрастала, причем скорость ее роста со временем падала (рис. 2). Наиболее любопытными оказались результаты химического анализа отобранных проб воды. На рисунке 1 представлена диаграмма распределения величины критерия δ по компонентам химического состава воды скважины. Величина δ задается выражением:

$$\delta = \frac{S_c^2}{S_v^2},$$

где S_c^2 – дисперсия результатов КХА каждого показателя в каждом из трех экспериментов; S_v^2 – дисперсия, характеризующая случайную составляющую погрешности определения соответствующего показателя. Значения величины $\delta \leq 1$ указывают на то, что дисперсия результатов количественного химического анализа полностью обуславливается случайной погрешностью самой процедуры КХА. Как видно на рис. 1, достоверная изменчивость наблюдается лишь в вариациях концентраций ионов кальция и сульфат-ионов и, в меньшей степени, в вариациях содержания кремниевой кислоты. Изменения остальных показателей макрокомпонентного состава воды укладываются в погрешности их определения. Кроме этого, изменения концентраций отмеченных показателей демонстрируют определенную закономерность, которая воспроизводится во всех циклах измерений (рис. 2). В случае ионов сульфата и кальция эта закономерность проявляется в резком S-образном увеличении их содержания в воде скважины через 4-5 часов с момента изменения расходы воды. Изменение содержания кремниевой кислоты, напротив, демонстрирует тенденцию к уменьшению с течением времени. Воспроизводимость результатов эксперимента дает основание считать выявленные эффекты вполне достоверными.

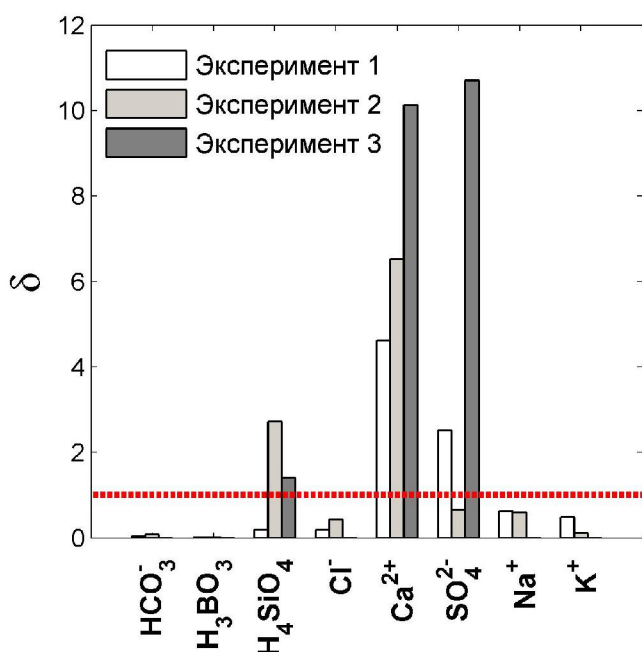


Рис. 1. Диаграмма распределения величин параметра δ по компонентам химического состава воды скважины ГК-17 в каждом из трех экспериментов (пояснение в тексте). Положение горизонтальной пунктирной линии соответствует величине $\delta = 1$.

Отмеченное выше скачкообразное увеличение концентраций сульфат-ионов и ионов кальция, из самых общих соображений, можно связать с "включением" некоего источника этих компонентов. Относительно природы источника рассматривалось несколько возможных вариантов. К примеру, можно предположить, что изменение концентраций этих ионов объясняется исключительно гидродинамическими процессами. Если опираться на модель гетерогенно-блоковой среды с двойной пористостью, которая довольно часто используется в гидрогеодинамических расчетах, то механизм увеличения содержания этих ионов в воде скважины можно представить следующим образом. Увеличение расхода воды скважины на устье сопровождается падением давления в системе "пласт – скважина". Возмущение давления распространяется в среде, состоящей из плохо проницаемых блоков, разделенных между собой относительно хорошо проницаемыми трещинами (гетерогенно-блоковая модель). В силу разной проницаемости скорость распространения возмущения давления в блоках и трещинах будет

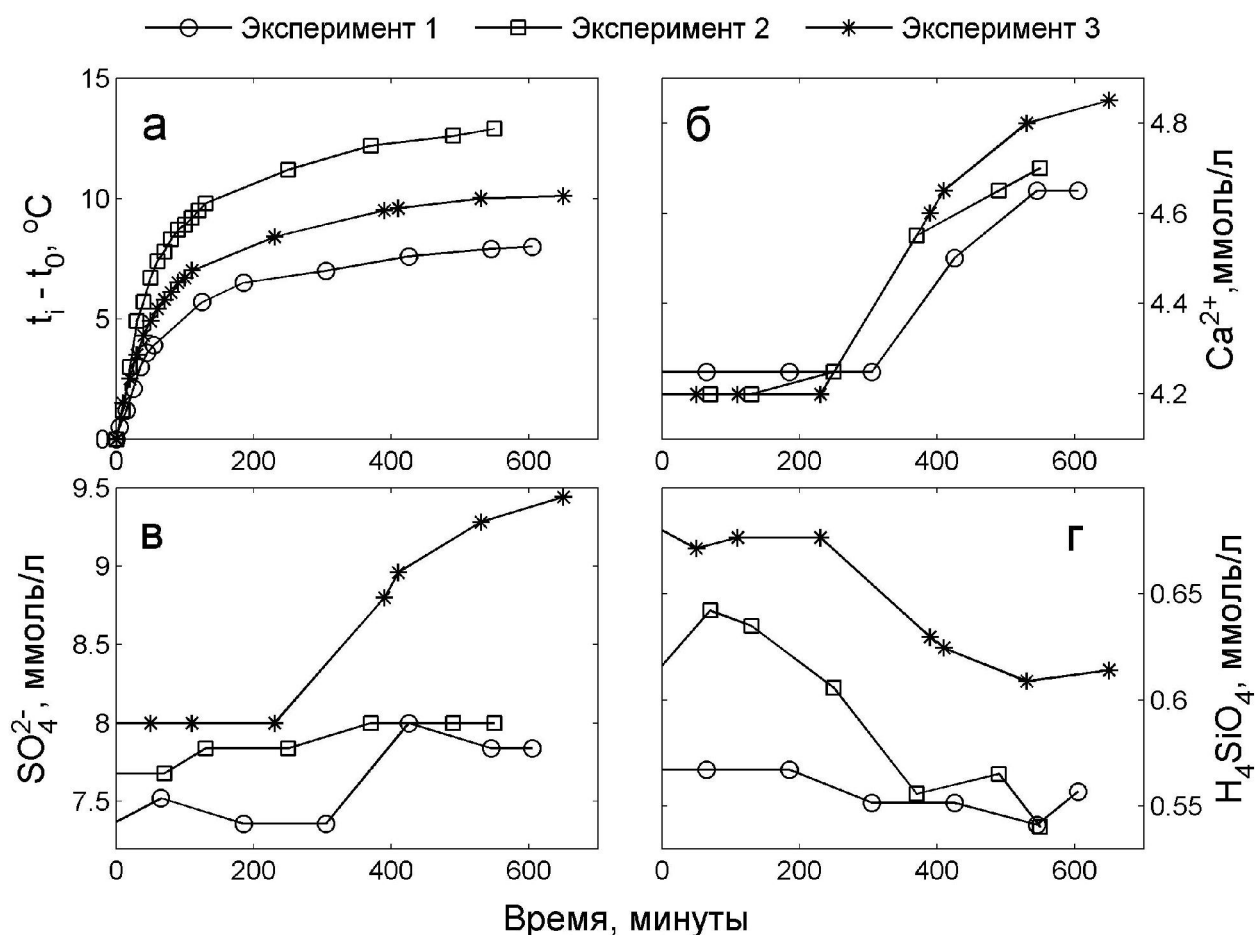


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая характер изменения температуры и отдельных показателей химического состава воды во время экспериментов на скважине ГК-17. Нулевое значение времени соответствует моменту изменения расхода воды скважины (начало эксперимента). **а** – изменения температуры воды скважины t_i относительно начальной t_0 . **б** – изменения концентрации ионов кальция. **в** – изменения концентрации сульфат-ионов. **г** – изменения концентрации кремниевой кислоты.

различной, что может привести к возникновению локальных градиентов давления между двумя средами. Под действием этих градиентов возникают фильтрационные потоки, направленные из блоков в трещины (например, [2]). Поскольку в стационарных условиях движение воды в плохопроницаемых блоках сильно затруднено, создаются более благоприятные условия для обогащения воды, в том числе, и ионами сульфата и кальция. В нестационарных условиях фильтрации вода из слабопроницаемых блоков, обогащенная ионами сульфата и кальция, попадает в трещины и затем в ствол скважины. Через некоторое время после момента возмущения давления описанные процессы должны приводить к увеличению содержания ионов кальция и сульфата в воде на устье скважины. При этом вода скважины должна обогащаться и другими компонентами, в особенности ионами натрия и калия, что не наблюдается в условиях эксперимента. Из этого можно сделать вывод о том, что рассмотренные выше процессы не объясняют экспериментальных результатов и, как минимум, не являются определяющими.

Альтернативная природа источника может быть связана с отложениями сульфатов кальция. Установлено, что при контакте воды, изливающейся из скважин Карымшинского участка (в том числе и скважины ГК-17), с атмосферой формируются твердые отложения гипса ($\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$) [5]. Выпадение гипса связано с насыщением воды относительно этой малорастворимой фазы при медленном ее испарении, тогда как более растворимые соли уносятся потоком раствора. Главной особенностью системы $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ является убывающая с температурой (ретроградная) растворимость двух стабильных твердых фаз, существующих в системе – α -гипса $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ и α -ангидрита CaSO_4 . При этом гипс имеет немонотонную растворимость в жидкой фазе с максимумом

при 33°C (15.6 ммоль/л) и плавится с разложением при 40°C [4]. При анализе растворимости этих соединений необходимо учитывать влияние фонового электролита, в качестве которого, пренебрегая деталями, можно рассматривать раствор хлорида натрия. Картина фазовых равновесий в системе $\text{CaSO}_4 - \text{NaCl} - \text{H}_2\text{O}$ обычна для подобных солевых систем. Растворимость гипса и ангидрита в присутствии NaCl увеличивается (солевой эффект), но характер температурной зависимости растворимости не меняется [6]. Как и в бинарной системе $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$, растворимость гипса немонотонна и проходит через максимум, который при увеличении концентрации фонового электролита смещается к высоким температурам.

При интерпретации результатов наблюдений на скв. ГК-17 необходимо принять во внимание, что, во-первых, измеренные концентрации Ca^{2+} и SO_4^{2-} далеки от насыщения как относительно гипса, так и относительно ангидрита, и, во-вторых, количества этих ионов в растворе существенно нестехиометричны: отношение $C_{\text{SO}_4^{2-}} : C_{\text{Ca}^{2+}}$ меняется в пределах от 1.70 до 1.95. Можно

предположить, что существует некоторый постоянный («фоновый») источник сульфат-ионов, которые выносятся на поверхность глубинным раствором. Таким источником могут служить медленно окисляющиеся сульфидные минералы, главным образом, пирит. Вместе с тем основной эффект – «скачок» концентраций $C_{\text{Ca}^{2+}}$ и $C_{\text{SO}_4^{2-}}$, – наступает одновременно для обеих этих величин,

что говорит о единстве источника. Если предположить, что источник находится в стволе скважины, то, с учетом времени водообмена, его положение должно соответствовать глубинам порядка 600 – 800 м. Температура воды на этих глубинах, по результатам термометрии скважины, составляет около 60-70°C. Увеличение расхода воды скважины на устье уменьшает время водообмена и соответственно теплопотери при движении воды к устью. Из этого следует, что увеличение расхода воды может приводить только к росту температуры на глубинах 600 – 800 м и, как следствие, к уменьшению растворимости сульфатов кальция, что входит в противоречие с полученными результатами.

С учетом вышеизложенного, можно предположить следующий механизм формирования эффекта. Он предусматривает источник вещества в виде отложений гипса и/или ангидрита в верхних частях разреза пород, через которые фильтруются относительно холодные воды. При увеличении расхода на устье скважины скорость фильтрации через эти породы увеличивается, что вызывает не повышение, как в стволе скважины, а, напротив, локальное понижение температуры в прискважинном пространстве. Это, в свою очередь, влечет увеличение растворимости сульфата кальция. Далее обогащенный сульфатом раствор попадает в ствол, смешивается с более горячей водой и выносится на поверхность. В этом случае возможно переотложение сульфата кальция в близких к стволу прогреваемых областях и, таким образом, перенос этого вещества с относительно холодными водами в прискважинное пространство. В пользу этого механизма свидетельствуют результаты геофизических исследований скважины ГК-17, проводившихся после окончания ее бурения. В соответствии с этими результатами, ниже обсадных труб, на глубине порядка 200 м, имеется водоприток относительно холодных вод. Наличие этого водопритока идентифицируется на термограмме и подтверждается результатами кавернометрии и ризистивиметрии.

Обсуждение результатов

Гидродинамическое исследование скважин на нестационарных режимах фильтрации широко применяется в нефтегазовой отрасли и в гидрогеологии, поскольку позволяет получать информацию о фильтрационных свойствах водонасыщенных горных пород. Тем не менее, нам не известны работы, в которых методы гидродинамических исследований скважин применялись бы в контексте рассматриваемой проблемы – генезиса гидрогеохимических эффектов, предшествующих землетрясениям. Естественно поэтому, что используемая нами методика несовершенна. Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже относительно слабое воздействие на систему "пласт-скважина" способно инициировать процессы перераспределения вещества в подземных водах, источник которого находится в зоне возмущения.

Практическую полезность полученных результатов можно продемонстрировать на следующем гипотетическом примере. Допустим, что рассматриваемые в работе эффекты – увеличение концентраций ионов сульфата и кальция в воде скважины, наблюдаются в натурных невозмущенных условиях. В соответствии с предложенным механизмом обогащение воды этим компонентами может происходить в результате увеличения скоростей фильтрации, которое, в свою очередь, может быть обусловлено улучшением проницаемости верхних частей разреза горных пород. Улучшение проницаемости, в частности, может являться следствием развития приповерхностной

зоны дилатансии, существование которой предполагается в рамках одной из моделей подготовки землетрясений [1]. Безусловно, приводимые выше рассуждения имеют умозрительный характер, однако они основываются на достоверно установленных эффектах. По крайней мере, можно предполагать, что в сходных природных условиях аналогичные эффекты будут регламентироваться аналогичными процессами. В иных природных условиях, описанная здесь методика анализа реакции гидрогеохимической системы на контролируемое воздействие может дать другие интересные результаты и следствия. Это говорит лишь о том, что исследования, результаты которых представлены в данной работе, вполне достойны продолжения и дальнейшего развития.

Выводы

1. На скважине ГК-17 была проведена серия экспериментов с целью изучения поведения гидрогеохимической системы в условиях нестационарного режима фильтрации.
2. В результате экспериментов достоверно установлено изменение химического состава воды скважины за счет увеличения содержания в ней, главным образом, ионов кальция и сульфат-ионов.
3. Рассмотрены процессы, в результате протекания которых могут образовываться выявленные эффекты. Наиболее вероятный из них связан с изменением растворимости отложений сульфатов кальция (гипс, ангидрит) в результате изменения скоростей фильтрации в условиях нестационарного режима.

Авторы работы выражают признательность ГУП "Камчатскбургеотермия" за предоставленную возможность проводить наблюдения и исследования на скважинах Карымшинского участка Верхне-Паратунского месторождения термальных вод.

Список литературы

1. Алексеев А. С., Белоносов А. С., Петренко В. Е. О концепции междисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2001. № 32. С. 81-97.
2. Баренблатт Г.И. и др. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с
3. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 237 с.
4. Киргинцев А. Н.и др. Растворимость неорганических веществ в воде: Справочник. Л.: Химия, 1972. 248 с.
5. Наумов А.В., Сергеева А.В. Гипс Верхне-Паратунского месторождения термальных вод (в настоящем сборнике).
6. Справочник по растворимости. В 3-х т. Под ред. В. В. Кафарова. Т. 3: Тройные и многокомпонентные системы, образованные неорганическими веществами. Кн. 3. Л.: Наука, 1970. 1221 с.