



УДК

556.314:550.344.37:550.34.013.4

Г. Н. Копылова, С. В. Болдина, Е. Г. Сизова

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683 006;
e-mail: gala@emsd.ru

О механизме аномалий гидрогеохимического режима самоизливающихся скважин, вызванных землетрясениями

С использованием моделирования, рассматривается механизм формирования гидрогеохимических аномалий в режиме подземных вод на стадиях подготовки и реализации землетрясений, за счёт изменения условий смешивания различных по составу вод в водоносных системах самоизливающихся скважин. Представлен пример моделирования изменений концентраций макрокомпонентов химического состава воды в скважинах 1, ст. Морозная, и ГК-1 ст. Пиначево в период Шипунского землетрясения 2 марта 1992 г., $M = 6,9$. Для скважины 1 оценён состав смешивающихся вод, поступающих из слабопроницаемых блоков и системы трещин.

Введение

Гидрогеохимические наблюдения на самоизливающихся скважинах и источниках являются одним из методов поиска предвестников землетрясений. Такие наблюдения включают систематический отбор проб воды на химический анализ. В результате формируются временные ряды изменений отдельных компонентов в составе подземной воды. По поведению таких временных рядов выделяются аномалии, вызванные процессами подготовки землетрясений (или гидрогеохимические предвестники), а также постсейсмические эффекты. Вместе с тем, информативность метода при проведении сейсмопрогностических работ не имеет окончательной оценки. В частности, весьма слабо освещён вопрос о том, какие процессы в природно-технических системах «скважина-водовмещающая порода» обеспечивают формирование гидрогеохимических аномалий. Такой вопрос может разрешаться с помощью моделирования зарегистрированных аномалий в изменениях химического состава подземной воды, изливающейся из скважины.

Основу моделирования гидрогеохимических аномалий составляют представления о механизме их формирования и соответствующие функциональные зависимости. В [5] рассматривались возможные механизмы образования гидрогеохимических аномалий на стадиях подготовки землетрясений, в результате анализа которых, авторы приходят к выводу о том, что модель смешивания в водоносных системах вод с различным составом является наиболее универсальной для объяснения аномалий в режиме подземных вод.

В [6] представлен гидродинамический анализ смешивания двух различных по составу вод в зоне повышенной водопроницаемости в водовмещающих породах в фоновых и возмущённых условиях. По-

казано, что в возмущённых условиях изменение концентрации компонента в изливающейся из скважины смешанной воде описывается зависимостью:

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

где $\delta\sigma(t)$ — изменение концентрации компонента (мг/л) во времени t ; $\delta\sigma_0$ — амплитуда изменения концентрации компонента, мг/л. Величины t_0 — время релаксации импульса давления в водоносной системе, сут и τ_0 — время движения потока смешанной воды, сут, характеризуют возмущённое гидродинамическое состояние водоносной системы.

При моделировании гидрогеохимических аномалий с использованием (1) величины $\delta\sigma_0$ для каждого компонента состава воды можно оценить по данным наблюдений. Величины t_0 и τ_0 определяются подбором при минимальном расхождении модели и экспериментальных данных по всем основным макрокомпонентам состава воды. Необходимыми условиями также являются электрическая нейтральность подземной воды и учёт ошибок аналитического определения каждого компонента состава воды.

Моделирование гидрогеосейсмических вариаций химического состава воды

Рассмотрим аномалии в изменениях составов вод из самоизливающихся скважин Морозная-1 (далее М-1) и Пиначево-ГК-1 (ГК-1) в период землетрясения 2 марта 1992 г., $M_w = 6,8$, интенсивность сотрясений в районах скважин $I = 5-6$ баллов, эпицентральное расстояние от наблюдательных пунктов — 135 км [2].

Гидрогеохимическая аномалия в скв. М-1 (объём воды в стволе $V = 7,3$ м³, расход изливающейся воды $Q = 1,5-1,3$ дм³/с, время его разгрузки за счёт самоизлива $T = 1-1,6$ ч, периодичность отбо-

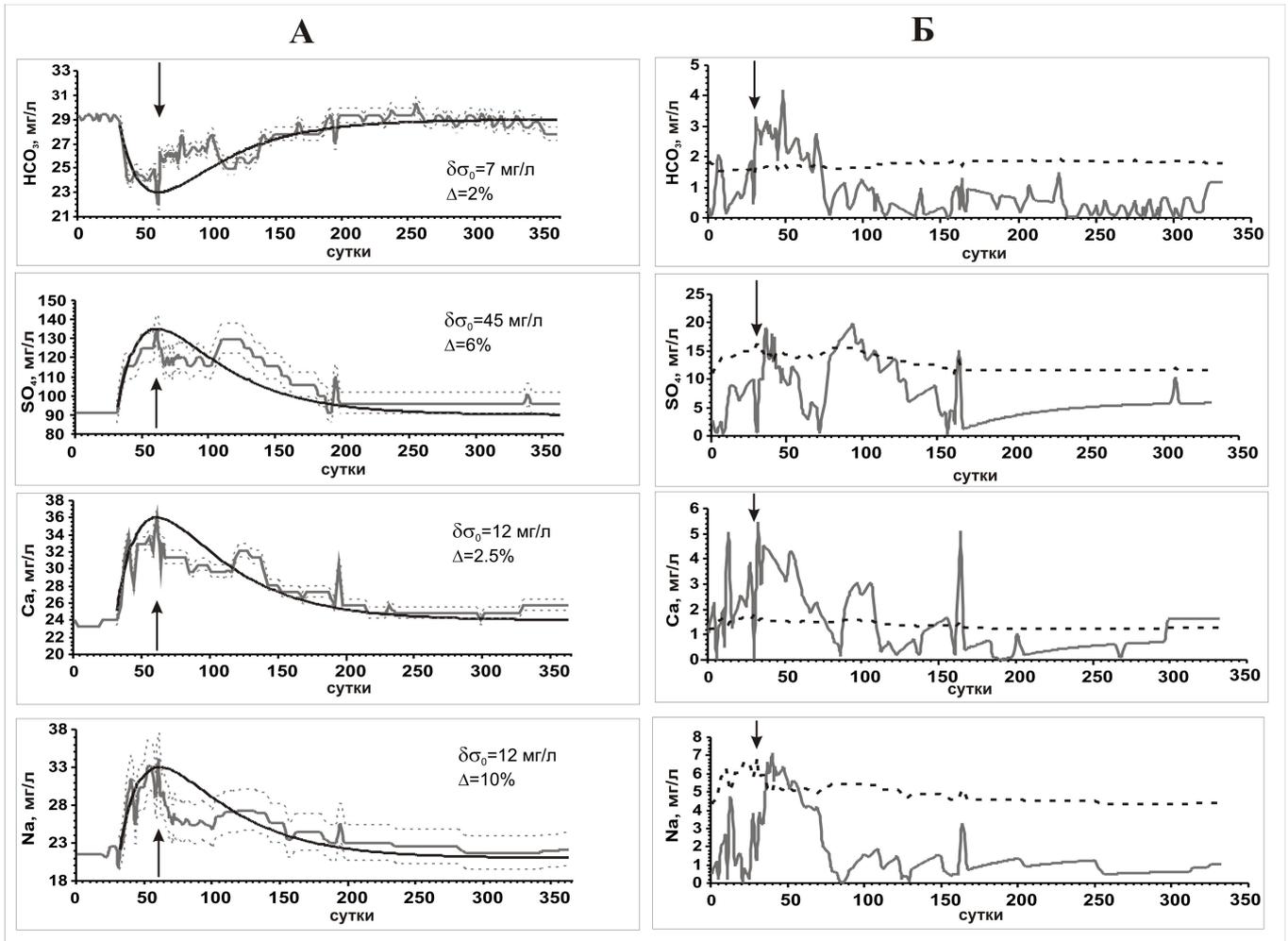


Рис. 1. А – Изменение концентраций HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ в воде скважины Морозная-1 в период землетрясения 02 марта 1992 г. (стрелка) и результаты моделирования по (1) при $t_0 = 20$ сут и $t_0 = 50$ сут. Серые линии – данные наблюдений; пунктирные линии – интервалы изменения концентраций в соответствии с относительной ошибкой определения отдельных компонентов в составе воды; чёрные линии – модельные изменения концентраций; Δ – ошибка аналитического определения компонента состава воды. Б – изменения абсолютных величин разностей между измеренными концентрациями и их модельными значениями (сплошные линии) в сопоставлении с изменением двойных ошибок определения каждого значения концентрации (пунктирная линия).

ра проб воды $\Delta t = 3$ сут) проявилась перед землетрясением в увеличении минерализации воды на 30% и в изменении гидрохимического типа воды за счёт относительного увеличения SO_4^{2-} и уменьшения HCO_3^- . Химический состав воды соответствовал формулам: $M_{0,19} \frac{\text{SO}_4 78 \text{HCO}_3 20}{\text{Ca} 56 \text{Na} 44}$ – в фоновых условиях (ошибка химического анализа воды в пробе 6%), $M_{0,25} \frac{\text{SO}_4 87 \text{HCO}_3 11}{\text{Ca} 55 \text{Na} 45}$ – на стадии аномалии (1%), где концентрации анионов и катионов выражены в %-экв/дм³, M – минерализация воды, г/дм³.

На рис. 1 представлены изменения концентраций макрокомпонентов и результаты моделирования по формуле (1) с учётом ошибок химического анализа каждого компонента. Получено удовлетворительное соответствие модели и наблюдаемых данных при величинах параметров $t_0 = 20$ сут и $t_0 = 50$ сут. Наибольшее расхождение модели и данных соответствует времени непосредственно после землетрясе-

ния (рис. 1Б). Мы полагаем, что это было вызвано наложением эффекта от сейсмических сотрясений на развитие предвестниковой аномалии. Изменение химического состава воды на постсейсмической стадии проявилось в относительном увеличении концентрации HCO_3^- и в уменьшении концентраций SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Na^+ (рис. 1А), т.е. было противоположным, по сравнению с предвестниковым эффектом.

Химический состав воды в скв. ГК-1 ($V = 16,2 \text{ м}^3$, $Q = 0,1 \text{ дм}^3/\text{с}$, $T = 1,9$ сут, $\Delta t = 3$ сут) соответствует формуле $M_{10} \frac{\text{Cl} 98}{\text{Na} 68 \text{Ca} 27}$. На стадии подготовки землетрясения аномалия проявилась в уменьшении концентрации Cl^- на 180 мг/л или на 3% по отношению к фоновой концентрации. На постсейсмической стадии происходило увеличение концентрации Cl^- (рис. 2А). В изменениях других макрокомпонентов – Na^+ и Ca^{2+} , эффект подготовки землетрясения проявился менее отчётливо. Поэтому моделирование

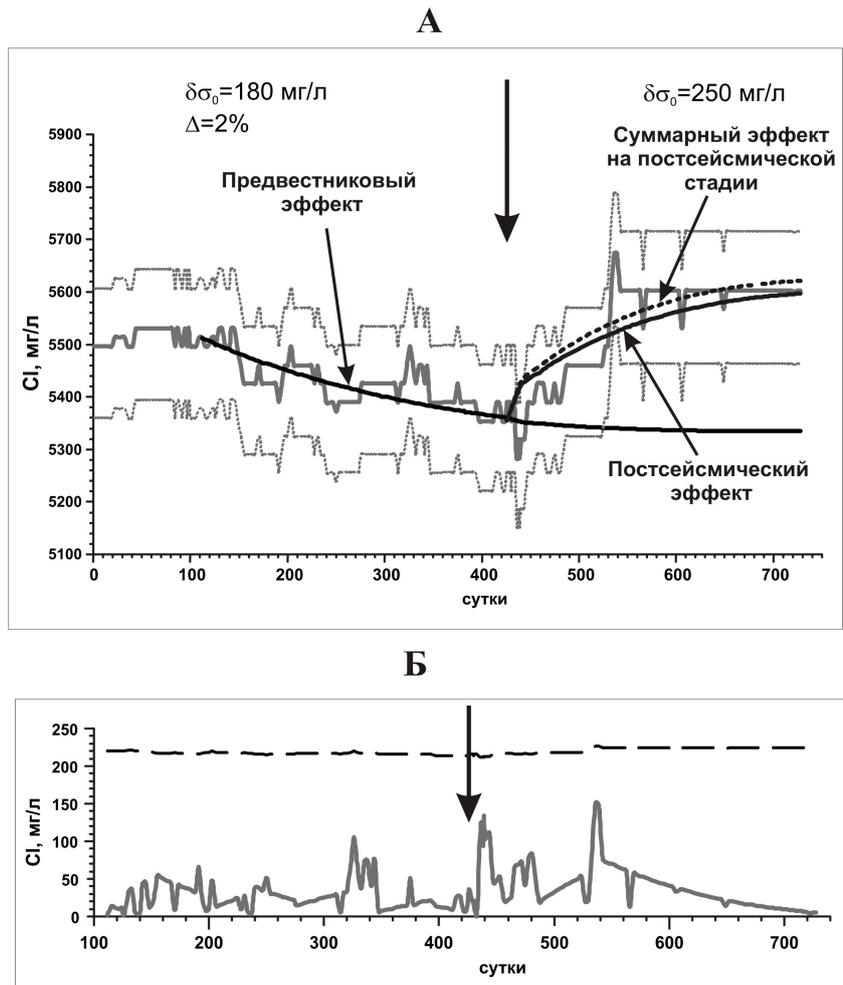


Рис. 2. А — Изменение концентрации Cl^- в воде скважины ГК-1 в период землетрясения 02 марта 1992 г. (стрелка) и результаты моделирования по (1) предвестникового эффекта при $t_0 = 120$ сут, $\tau_0 = 350$ сут и постсейсмического эффекта при $t_0 = 90$ сут, $\tau_0 = 200$ сут. Серая линия — данные наблюдений; пунктирные линии — интервалы изменения концентрации Cl^- в соответствии с относительной ошибкой определения Δ ; чёрные сплошные линии — модельные изменения концентрации на предвестниковой и постсейсмической стадиях, чёрная пунктирная линия — суммарный эффект двух процессов на постсейсмической стадии. Б — изменение абсолютных величин разности между измеренными концентрациями и их модельными значениями (сплошная линия) в сопоставлении с изменением двойной ошибки определения каждого значения концентрации (пунктирная линия).

проводилось только по изменениям концентрации Cl^- , отдельно для предвестникового и постсейсмического эффектов. Отсутствие чётких гидрогеосейсмических вариаций в изменениях Na^+ и Ca^{2+} не позволяет использовать данные по катионам в моделировании, что понижает обоснованность результатов для скв. ГК-1. Вместе с тем, очевидно, что в скв. ГК-1 на стадии подготовки землетрясения происходило разбавление подземной воды (уменьшение концентрации Cl^-), на постсейсмической стадии — концентрирование подземной воды (увеличение концентрации Cl^- и др. макрокомпонентов).

Расчёт составов смешивающихся вод для скважины М-1

Результаты моделирования (рис. 1) позволяют полагать, что в водоносной системе скв. М-1 происходило смешивание двух вод с различными хи-

мическими составами. Эти воды поступают в ствол скважины в области трёх перфорированных участков (рис. 3А).

Для оценки составов смешивающихся вод принималась модель водоносной системы как среды с двойной пористостью [1] (рис. 3Б). В такой среде основной поток подземной воды осуществляется по системе крупных взаимосвязанных трещин. Трещины разделяют слабопроницаемые блоки, в пустотах которых содержится вода с повышенной минерализацией. В фоновых условиях имеет место стационарный режим водообмена между трещинами и блоками, и химический состав изливающейся из скважины смешанной воды является стабильным. При воздействии фактора подготовки землетрясения происходит изменение гидродинамических условий в водоносной системе, и стационарный

Таблица 1. Расчётные составы смешивающихся вод в водоносной системе скважины Морозная-1

Соотношение долей смешивающихся вод в фоновых условиях $n : m$	Состав воды C_1 (трещины)	Состав воды C_2 (блоки)	Соотношение долей смешивающихся вод на стадии аномалии $n' : m'$
0,9:0,1	$M_{0,17} \frac{SO_4 72 HCO_3 25}{Ca 53 Na 46}$	$M_{0,37} \frac{SO_4 97 HCO_3 2}{Ca 66 Na 34}$	0,6:0,4
0,87:0,13	$M_{0,17} \frac{SO_4 71 HCO_3 25}{Ca 57 Na 42}$	$M_{0,34} \frac{SO_4 96 HCO_3 3}{Ca 53 Na 46}$	0,5:0,5
0,8:0,2	$M_{0,16} \frac{SO_4 71 HCO_3 26}{Ca 56 Na 43}$	$M_{0,32} \frac{SO_4 90 HCO_3 8}{Ca 54 Na 45}$	0,2:0,8
0,7:0,3	$M_{0,14} \frac{SO_4 65 HCO_3 31}{Ca 56 Na 43}$	$M_{0,30} \frac{SO_4 90 HCO_3 8}{Ca 55 Na 44}$	0,2:0,8

режим водообмена нарушается. Это сопровождается более активным поступлением растворенного вещества из «блоков» в «трещины», и химический состав изливающейся воды изменяется.

При расчёте составов двух вод принимались линейные условия их смешивания в водоносной системе: $C = nC_1 + mC_2$, $n + m = 1$, где C — кон-

центрация компонента в смешанной воде (рис. 3А), C_1 — концентрация компонента в «трещинах», C_2 — концентрация компонента в «блоках» (рис. 3Б), n и m — доли вод из «трещин» и «блоков» в смешанной воде. В фоновых условиях $n > m$. По данным наблюдений оценивались граничные значения концентраций в смешивающихся водах (в мг/л). Для HCO_3^- принималось $C_1 > 31,2$ и $C_2 < 22$, для SO_4^{2-} — $C_1 < 77$, $C_2 > 134,5$; для Na^+ — $C_1 < 21$, $C_2 > 34,2$; для Ca^{2+} — $C_1 < 23$, $C_2 > 36$ (рис. 1А). Также принималось условие электрической нейтральности растворов и задавалась ошибка «условного анализа» катионов и анионов во всех трёх растворах $\leq 6\%$. При таких условиях решения были получены для величин n в интервале 0,9–0,7 и, соответственно, $m = 0,1–0,3$. Расчётные составы смешивающихся вод приводятся в табл. 1.

При определении долей смешивающихся вод на стадии аномалии (n' и m') использовались расчётные составы смешивающихся вод. Также проводилась проверка на устойчивость отношения $n' : m'$ по отдельным катионам и анионам и по всем возможным парам катион-катион, анион-анион, анион-катион.

Расчёты показывают, что в «трещинах» фильтруется вода с минерализацией 0,14–0,17 г/л, её состав — гидрокарбонатно-сульфатный натриево-кальциевый. Минерализация воды в «блоках» может составлять 0,30–0,37 г/л, её состав — сульфатный натриево-кальциевый. Предвестниковая гидрогеохимическая аномалия в изливающейся воде (рис. 1А) была обусловлена увеличением доли растворённого вещества из «блоков» и уменьшением его доли из «трещин». В результате сейсмических сотрясений произошло относительно кратковременное увеличение доли воды из «трещин» в изливающейся воде (рис. 1).

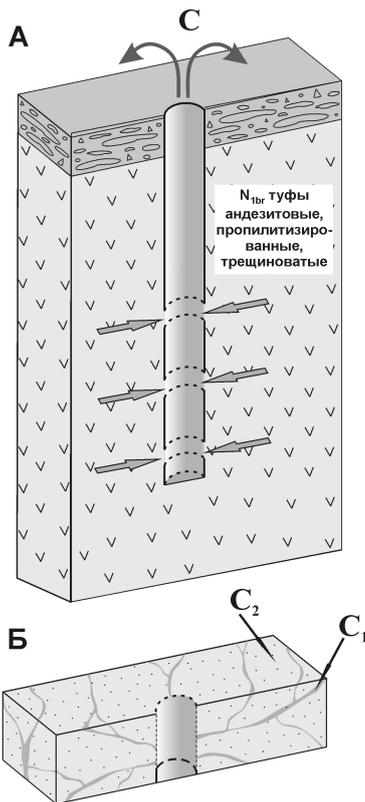


Рис. 3. А — Скважина Морозная-1 и её водоносная система: пунктирными линиями показаны участки перфорации ствола скважины, горизонтальные стрелки — поступление смешанной воды в ствол скважины, C — концентрация компонента в изливающейся из скважины смешанной воде; Б — схема водоносной системы — среда с двойной пористостью: C_1 — концентрация компонента в воде из трещин, C_2 — концентрация компонента в воде из блоков.

Заключение

1. Результаты моделирования вариаций макрокомпонентного состава воды самоизливающихся скважин на стадии подготовки землетрясения, а также постсейсмических изменений [3, 6], показывают широкую применимость модели смешивания контрастных по химическому составу вод в водоносных

системах для объяснения гидрогеохимических аномалий. На основе этой модели по развитию аномалии и с использованием (1) могут оцениваться параметры гидродинамического состояния водоносной системы: t_0 — время релаксации давления и τ_0 — время движения потока смешанной воды.

Если параметры t_0 и τ_0 малы, то при большой периодичности наблюдений Δt аномалия может не выделяться, либо представление о её форме будет искажено. Например, аномалия в скв. М-1 (рис. 1А) по морфологическим признакам в [2, 4] классифицировалась как «скачкообразная». В данном случае, причиной неверного суждения является «большая» периодичность наблюдений $\Delta t = 3$ сут, которая не позволяла оценить реальную форму аномалии по изменениям временных рядов. При этом такая периодичность наблюдений оказалась достаточной для оценки «бухтообразных» форм аномалии в скв. ГК-1 (рис. 2А; $t_0 = 120$ сут, $\tau_0 = 350$ сут) и постсейсмических изменений концентрации хлор-иона в воде Пиначевского источника 1 ($t_0 = 34$ – 64 сут, $\tau_0 = 30$ – 91 сут) [3].

2. На примере скв. Морозная-1 построена модель формирования наблюдаемой гидрогеохимической аномалии макрокомпонентного состава изливающейся воды за счёт смешивания в водоносной системе вод с различным химическим составом. Оценены химические составы смешивающихся вод и показано, что на стадии подготовки землетрясения происходило увеличение поступления воды

из слабопроницаемых блоков в трещинную систему. В результате сейсмических сотрясений, на постсейсмической стадии, происходило относительное увеличение поступления растворённого вещества из трещин.

Список литературы

1. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // ДАН СССР. 1960. Том. 132. № 3. С. 545–548.
2. 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.
3. Копылова Г. Н., Воронаев П. В. Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 42–48.
4. Рябинин Г. В., Хаткевич Ю. М. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 107–122.
5. Thomas D. Geochemical precursors to seismic activity // Pure Appl. Geophys. 1988. Vol. 126. P. 241–266.
6. Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. Modeling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int. 2004. Vol. 157. P. 717–726.