

УДК 556.33:550.348

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В РЕЖИМЕ
ПИНАЧЕВСКОГО ИСТОЧНИКА 1

П.В. Воропаев¹, Г.Н. Копылова^{2,1}

¹ Камчатский государственный педагогический университет, Петропавловск-Камчатский, 683032, E-mail: chicoli@mail.iks.ru

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, E-mail: gala@emsd.iks.ru

Введение

С 1971 г. по настоящее время проводятся наблюдения с частотой один раз в трое суток на двух Пиначевских источниках и на расположенной в 100 м самоизливающейся скважине ГК1 (Восточная Камчатка, 53.28° с.ш., 158.40 в.д.). Наблюдения на всех водопроявлениях включают измерения дебитов, температуры воды, определение концентраций компонентов химического состава воды и газа. В работах [1-4] отмечалась стабильность режима источников во времени и регулярность их откликов на землетрясения. После землетрясений дебиты источников всегда повышаются и достигают максимальных величин в течение первых часов после толчка (рис. 1). Концентрации компонентов химического состава воды и растворенного метана достигают максимальных величин одновременно в течение первых десятков суток после землетрясения.

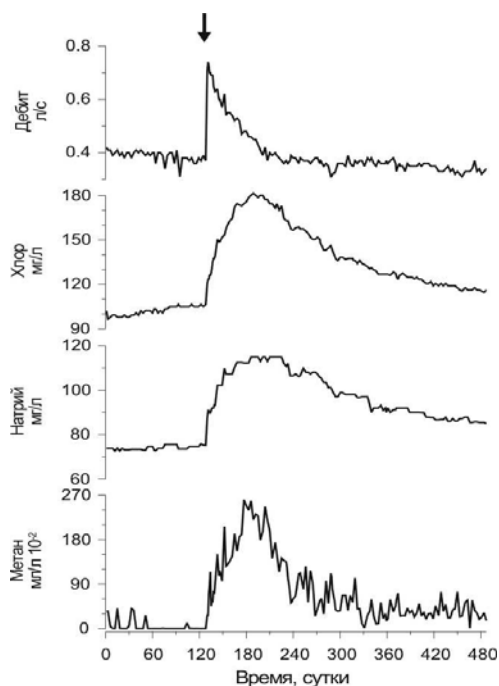


Рис. 1. Изменение параметров режима источника 1 после землетрясения 6.10.1987 г., $M=6.6$, $R=135$ км (показано стрелкой). Период наблюдений с 1.06.87 г. по 29.09.1988 г.

Такие изменения параметров режима источников позволяют сделать следующие предположения о механизме формирования постсейсмических аномалий: 1 - динамическое воздействие сейсмических волн на водоносную систему источников вызывает повышение в ней флюидного давления, так как дебиты всегда увеличиваются; 2 - рост концентраций компонентов химического состава воды вызывается не только повышением давления, но и изменением соотношения между водами с различной концентрацией при их смешивании за счет увеличения подтока более минерализованной воды; 3 - повышение давления в водоносной системе источников имеет неоднородное (локализованное) распределение. В противном случае

наблюдалось бы только увеличение дебитов без проявления гидрогеохимических аномалий.

В работе представлена математическая модель смешивания двух контрастных по минерализации вод в водоносной системе Пиначевских источников в невозмущенных условиях и при воздействии землетрясений. Для этого проводилась схематизация условий в питающей водоносной системе по материалам гидрогеологического опробования скважины ГК1 [1] и по данным режимных наблюдений КОМСП ГС РАН в 1977-1995 гг. В качестве показателя смешивания принята концентрация хлора как наиболее надежно определяемого компонента химического состава воды [4].

Водоносная система

Данные опробования скважины ГК1 показывают увеличение температуры воды, концентраций хлора и других компонентов химического состава воды и газа с глубиной [1]. Это указывает на наличие в районе восходящего потока термальных вод, в котором температура и минерализация подземной воды уменьшаются с приближением к поверхности земли. Поэтому для каждой глубины Z_n можно принять некоторую фоновую величину концентрации хлора Cl_n^0 в воде (рис. 2 А). Источники 1 и 2 расположены на расстоянии 7 м друг от друга. Они 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 ист. 2 больше соответствующих величин для ист. 1. Смешивание двух вод происходит в зонах с повышенной водопроницаемостью (1 и 2 на рис. 2 А), соединенных с поверхностью каналом источника.

Если принять линейный характер смешивания двух вод и пренебречь временем смешивания, то можно записать для каждого источника: $Cl = nCl_n + mCl_m$, $n + m = 1$ и $Cl_n < Cl < Cl_m$, где Cl - концентрация хлора в воде источника; Cl_n - фоновая концентрация хлора, соответствующая глубине зоны смешивания Z_n ; n - доля воды с концентрацией Cl_n в смешанной воде; Cl_m - концентрация хлора в минерализованной воде; m - доля воды с концентрацией Cl_m в смешанной воде.

Концентрация хлора в воде источника 1 (Cl_1) в невозмущенных условиях составляет 60-125 мг/л и достигает 140-330 мг/л после сейсмического воздействия. Отсюда следует, что $Cl_n^1 < 60$ мг/л, а $Cl_m^1 > 330$ мг/л. Если принять, что концентрации $Cl_n^1 = 50$ мг/л, а $Cl_m^1 = 350$

мг/л, то соотношение долей фоновой и минерализованной воды в невозмущенных условиях $n : m = 75 - 87\% : 25 - 13\%$. Для источника 2 $Cl_n^2 < 320$ мг/л, а $Cl_m^2 > 355-500$ мг/л.

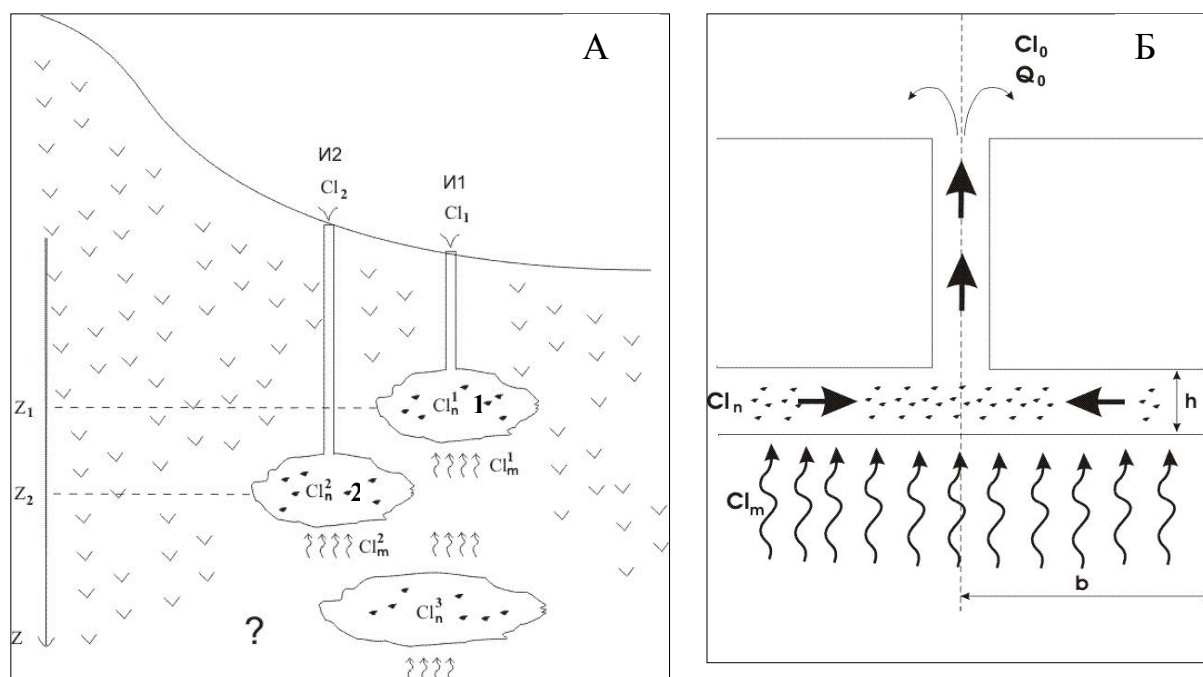


Рис. 2. А - Схема водоносной системы Пиначевских источников: И1 - источник 1, И2 - источник 2; Z_1 , Z_2 - глубины, соответствующие зонам повышенной водопроницаемости (зонам смешивания) 1 и 2; Cl_n^1, Cl_n^2 - концентрации хлора в подземной воде на глубинах Z_1 и Z_2 ($Cl_n^1 < Cl_n^2$); Cl_m^1, Cl_m^2 - 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.

Модель смешивания двух вод в водоносной системе источника 1 (рис. 2 Б) включает зону повышенной водопроницаемости, которая связана с поверхностью непроницаемым каналом и симметрична относительно него. 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.

Математическая модель для невозмущенных условий

В стационарных условиях радиальный поток смешанной воды через зону повышенной водопроницаемости имеет постоянную разгрузку $Q_0 = const$. Параметры потока зависят только от горизонтального расстояния r до канала источника и определяются уравнениями (1) – (3):

$$q_m(r) = m \frac{Q_0}{\pi b^2} e^{-r^2/b^2}, \quad (1)$$

где $q_m(r)$ - скорость поступления минерализованной воды в зону смешивания;

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rv(r)] = \frac{1}{h} q_m(r), \quad (2)$$

где $v(r)$ - скорость потока через зону смешивания;

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rv(r)\sigma(r)] = \frac{\sigma_m}{h} q_m(r), \quad (3)$$

где $\sigma(r)$ - концентрация хлора или другого компонента химического состава воды в зоне смешивания, b и h - радиус и мощность зоны повышенной водопроницаемости, σ_m - концентрация химического компонента в минерализованной воде.

Решение уравнения (2) дается как:

$$v(r) = \frac{Q_0}{2\pi hr} (n + me^{-r^2/b^2}). \quad (4)$$

Решение уравнения (3), удовлетворяющее условию $\sigma(r) \rightarrow \sigma(n)$ для $r \gg b$ (в удалении от канала источника концентрация хлора равна Cl_n^1) и $\sigma(r) \rightarrow n\sigma_n + m\sigma_m$ для $r \rightarrow 0$ (около канала источника концентрация хлора равна Cl_1), принимает вид:

$$\sigma(r) = \frac{n\sigma_n + m\sigma_m e^{-r^2/b^2}}{n + me^{-r^2/b^2}}, \quad (5)$$

где σ_n - концентрация хлора в фоновой воде, соответствующей глубине зоны смешивания.

Математическая модель для возмущенных условий

При воздействии землетрясения происходит изменение напора в системе, и параметры потока подземных вод становятся зависимыми от времени: $q_m(r) \rightarrow q_m(r, t)$, $v(r) \rightarrow v(r, t)$, $\sigma(r) \rightarrow \sigma(r, t)$, $Q_0 \rightarrow Q(t)$. Представляют интерес следующие отклонения параметров от их стационарного состояния: $\delta q_m(r, t) = q_m(r, t) - q_m(r)$ - отклонение в скорости поступления минерализованной воды; $\delta v(r, t) = v(r, t) - v(r)$ - отклонение в скорости движения потока через зону смешивания; $\delta \sigma(r, t) = \sigma(r, t) - \sigma(r)$ - отклонение в изменении концентрации хлора в зоне смешивания.

В этом случае уравнение перемещения потока смешанной воды с учетом изменения концентрации хлора записывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \delta \sigma(r, t) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rv(r) \delta \sigma(r, t)] = \frac{\sigma_m - \sigma(r)}{h} \times \left(\delta q_m(r, t) - \frac{q_m(r)}{v(r)} \delta v(r, t) \right). \quad (6)$$

Полагая неизменность пространственной структуры потока, получаем:

$$\delta q_m(r, t) = \delta m(t) \frac{Q_0}{\pi b^2} e^{-r^2/b^2}, \quad (7)$$

$$\delta v(r, t) = \frac{Q_0}{2\pi hr} (\delta n(t) + \delta m(t) e^{-r^2/b^2}), \quad (8)$$

$$\delta Q(t) = Q_0 [\delta n(t) + \delta m(t)], \quad (9)$$

где функции $\delta m(t) = \alpha \frac{\delta Q(t)}{Q_0}$ и $\delta n(t) = (1 - \alpha) \frac{\delta Q(t)}{Q_0}$ выражают зависимые от времени вклады

вод с различной минерализацией в процесс смешивания, $\delta Q(t)$ - изменения дебита на постсейсмической стадии, α - корреляционный параметр, характеризующий вынужденное изменение долей смешивающихся вод с различной концентрацией.

Динамика постсейсмического изменения концентрации хлора описывается решением уравнения перемещения потока (6)

$$\delta \sigma(t) = \lim_{r \rightarrow 0} \delta \sigma(r, t) = (m + \alpha) \Delta \sigma \int_0^t \frac{\delta \sigma(t')}{Q_0} e^{-(t-t')/\tau_0} dt', \quad (10)$$

где $\Delta \sigma = \sigma_m - \sigma_n$ - разность между концентрациями хлора в двух водах, $\tau_0 = \frac{\pi b^2 h}{n Q_0}$ - параметр, характеризующий время перемещения потока через область смешивания и определяющий форму постсейсмической аномалии в изменении концентрации хлора, Q_0 - средний дебит источника до возмущения.

Моделирование постсейсмических аномалий (рис. 3)

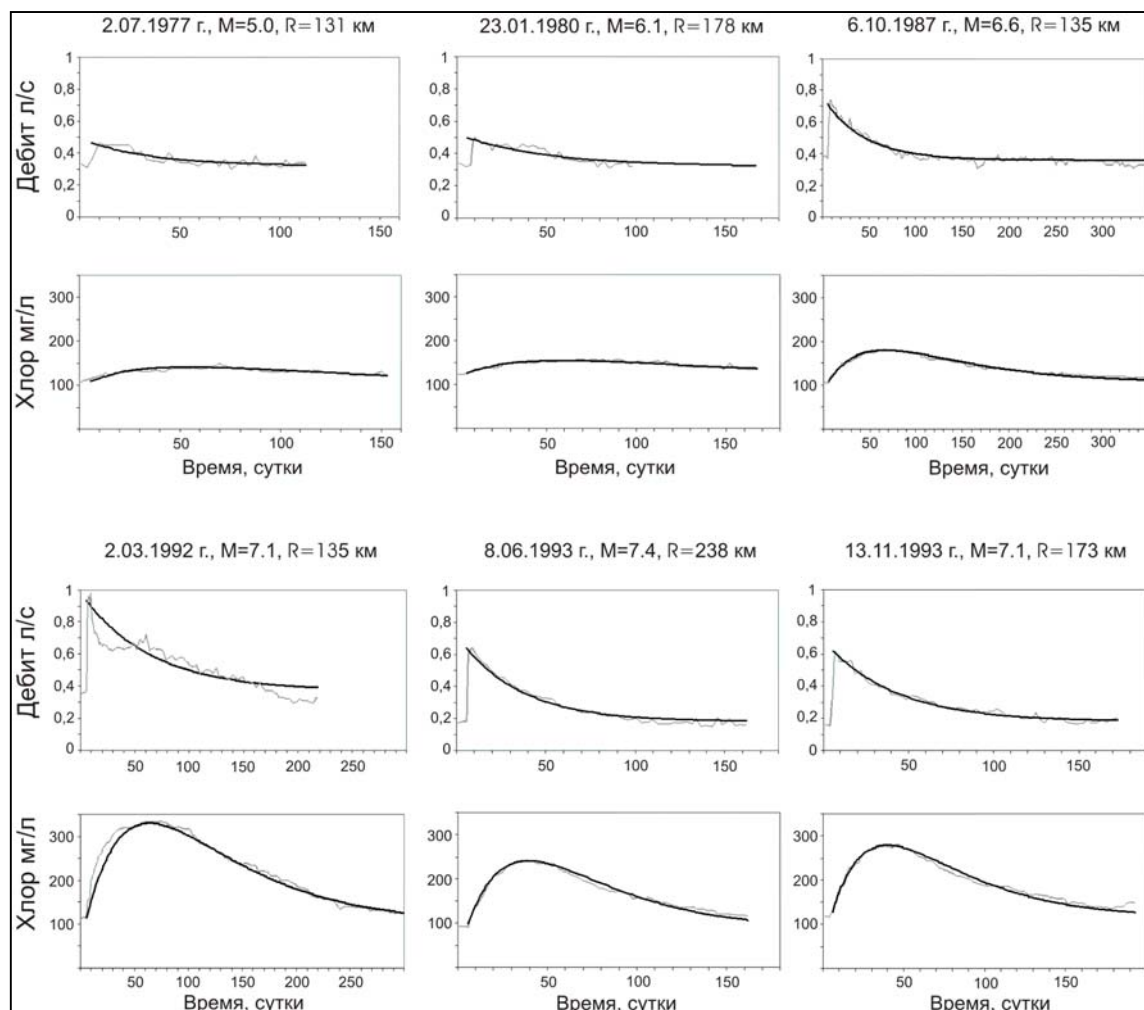


Рис. 3. Постсейсмические изменения дебита и концентрации хлора в результате воздействия шести землетрясений 1977-1993 гг. Серым цветом показаны данные наблюдений на источнике 1, черным цветом показано модельное приближение.

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

$$\delta Q(t) = \delta Q_0 e^{-t/t_0}, \quad (11)$$

где δQ_0 - амплитуда косейсмического увеличения дебита, t_0 - характерное время релаксации напора.

Динамика постсейсмического изменения концентрации хлора выражается как:

$$\delta \sigma(t) = \delta \sigma_0 \frac{e^{-t/t_0} - e^{-t/\tau_0}}{(1 - \tau_0/t_0) \beta(\tau_0, t_0)}, \quad (12)$$

где $\delta \sigma_0 = (m + \alpha) \Delta \sigma \frac{\delta Q_0}{Q_0} \beta(\tau_0, t_0)$ - максимальная амплитуда постсейсмического повышения

концентрации хлора; $\beta(\tau_0, t_0) = (\tau_0/t_0)^{\frac{t_0}{t_0 - \tau_0}}$ - нормализованный коэффициент функции времени $(e^{-t/t_0} - e^{-t/\tau_0}) / (1 - \tau_0/t_0)$, зависящий только от отношения τ_0/t_0 .

Таким образом, динамика постсейсмической аномалии в изменении концентрации хлора определяется тремя свободными параметрами: t_0 - параметром времени релаксации

напора в водоносной системе; τ_0 - параметром времени движения потока через зону смешивания; α - параметром, характеризующим вынужденную разгрузку двух вод с различной минерализацией.

Отношение долей смешивающихся вод на постсейсмической стадии определяется выражением

$$\frac{n + (1 - \alpha)\delta Q_0 / Q_0}{1 + \delta Q_0 / Q_0} : \frac{m + \alpha\delta Q_0 / Q_0}{1 + \delta Q_0 / Q_0} = n' : m' \quad (13)$$

Характеристика землетрясений, вызвавших изменения в режиме источника 1; параметры моделирования постсейсмических аномалий и результаты при $Cl_n^1=50$ мг/л и $Cl_m^1=350$ мг/л

№	Дата ггггммдд	M	R, км	M/lgR	Q_0 , л/с	δQ_0 , л/с	Cl_0 , мг/л	δCl_0 , мг/л	t_0 , сут	τ_0 , сут	$n : m$	$n' : m'$
1	19770702	5.0	131	2.36	0.32	0.15	107	35	34	76	0.81/0.19	0.77/0.23
2	19800123	6.1	178	2.71	0.32	0.18	125	30	49	60	0.75/0.25	0.71/0.29
3	19871006	6.6	135	3.10	0.36	0.36	105	75	43	94	0.81/0.19	0.74/0.26
4	19920302	7.1	135	3.33	0.37	0.57	105	225	64	55	0.86/0.14	0.45/0.55*
5	19930608	7.4	238	3.11	0.18	0.47	87	154	34	35	0.87/0.13	0.68/0.32
6	19931113	7.1	173	3.17	0.18	0.45	115	164	41	30	0.78/0.22	0.64/0.36

* на постсейсмической стадии принималась концентрация $Cl_m^1=500$ мг/л.

На рис. 3 и в таблице представлены результаты моделирования шести аномалий в изменении дебита и концентрации хлора. Величины t_0 и τ_0 определялись подбором. Критерием их выбора было минимальное отклонение фактических данных и модельного приближения. Изменения дебита и концентрации хлора после землетрясений 1-3, 5-6 (табл.) хорошо описываются модельными зависимостями. Для землетрясения 2.03.92 г. (4 в таблице) результат моделирования получился хуже. В этом случае не удалось подобрать параметры t_0 и τ_0 , которые бы описывали восходящую ветвь повышения концентрации хлора и понижение дебита в начальной стадии аномалии. По-видимому, модель смешивания двух контрастных по минерализации вод не вполне соответствует процессам, происходившим в водоносной системе источника после землетрясения 2.03.92 г. Изменение условий смешивания в водоносной системе проявилось в смещении долей фоновой и минерализованной воды $n' : m'$ в сторону увеличения доли минерализованной воды не только после землетрясения 2.03.92 г., но и при двух последующих землетрясениях 1993 г. (5 и 6 в таблице).

Обсуждение и выводы:

1. Предложенная модель смешивания двух контрастных по минерализации вод в зоне повышенной водопроницаемости объясняет большую часть постсейсмических аномалий в режиме источника 1.

2. Модель не объясняет изменение концентрации хлора в начальной стадии постсейсмической аномалии после наиболее сильного землетрясения 2.03.1992 г., M=7.1, R=135 км. Для объяснения этой аномалии можно привлекать следующие механизмы:

- увеличение концентрации хлора до 500-1000 мг/л в минерализованной воде, поступающей в зону смешивания;

- смешивание в зоне повышенной водопроницаемости в начальной стадии аномалии не двух, а трех вод с различной минерализацией за счет резкого увеличения проницаемости в водоносной системе Пиначевских источников по отношению к восходящему потоку минерализованных вод.

3. Модель не объясняет рост флюидного давления в водоносной системе с глубиной при сейсмическом воздействии. Такое объяснение находится, если предположить, что изменение давления обусловлено, в основном, выделением свободного газа, концентрация которого увеличивается с глубиной [5]. Данные о газовом составе в Пиначевских водопроявлениях показывают наличие свободного газа метаново-азотного состава в воде источников и газа азотно-метанового состава в воде скважины ГК1 [1-4]. При этом с ростом температуры и минерализации воды (т.е. с увеличением глубины формирования разгружающейся воды) содержание свободного газа увеличивается.

Выделение пузырьков газа при сейсмическом воздействии может вызывать изменение давления в водоносной системе тремя способами [5]: 1 - при удалении пузырьков газа из порового пространства происходит подстройка градиента напора из-за увеличения водопроницаемости в водоносной системе; 2 - адвективное увеличение давления, вызванное подъемом пузырьков газа к поверхности через канал источника; 3 - триггерное воздействие на дегазацию при внедрении в водоносную систему перенасыщенной газом минерализованной воды. Все три процесса могут развиваться в областях с постоянной газогенерацией и могут объяснять регулярность отклика термоминеральных источников на землетрясения.

Список литературы

1. *Гриц Г.Н.* Роль геодинамических факторов в формировании режима гидротерм на примере Пиначевских источников (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 30-37.
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.* Отклик режимного источника на землетрясения как индикатор состояния его водоносной системы // Вулканология и сейсмология. 2005 (в печати).
4. *Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 96-112.
5. *Wang R., Woith N., Milhereit C, Zschau S.* Modeling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int. 2004. V. 157. P. 717-726.