

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ФЛЮИДОВ ВСЛЕДСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. ЧАСТЬ 2. ВЕРОЯТНЫЙ МЕХАНИЗМ

***Г.Г. Кочарян, Е.А. Виноградов, В.К. Марков,
Д.В. Марков, Л.М. Перник***

В лабораторных экспериментах продемонстрирована возможность разрушения «барьеров», сформированных мелкими глинистыми частицами при воздействии импульса давления. Показано, что динамические воздействия могут приводить к изменению количества открытых трещин и их проницаемости. Экспериментально установлена возможность постепенного накопления эффекта при длительной виброобработке. Рассмотренная схема декольматации находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Важным представляется установленный факт пропорциональности скачка напора корню квадратному из максимального значения скорости смещения грунта.

Введение

Если теория динамических колебаний уровня воды в скважине достаточно хорошо разработана [Cooper et al., 1965], то механика остаточных изменений свойств подземных резервуаров остается неясной. В литературе рассматривалось несколько гипотетических механизмов, ни один из которых, однако, не получил сколь-нибудь серьезного экспериментального подтверждения. Как показывает анализ данных натурных наблюдений [Кочарян и др., 2010], дистанционные гидрогеологические эффекты землетрясений уверенно наблюдаются в диапазоне расстояний, где изменения статического поля напряжений незначительны, а амплитуды массовых скоростей сейсмических волн находятся в диапазоне от 0,1 см/с до первых см/с. Такие скорости колебаний соответствуют деформациям порядка 10^{-7} – 10^{-5} . При таких деформациях трудно ожидать разрушения породы или прорастания трещин в результате прохождения цуга колебаний. Более вероятными представляются эффекты декольматации трещин за счет возникновения избыточного давления при прохождении сейсмического импульса, а также эффекты кумулятивного

накопления межблоковых деформаций. последний эффект разобран в нескольких наших более ранних публикациях, например, [Кочарян, Бенедик и др., 2004; Кочарян и др., 2007]. Эта статья посвящена анализу возможности реализации предложенного в [Brodsky et al., 2003] механизма, в котором основную роль играет декольматация трещин.

Лабораторные эксперименты

Разобраться в физической приемлемости того или иного механизма могут помочь лабораторные эксперименты с контролируемыми параметрами воздействия.

В опытах исследовалась возможность реализации вероятных механизмов увеличения проницаемости – декольматации трещин под действием динамических импульсов и формирования проницаемых каналов при межблоковых перемещениях.

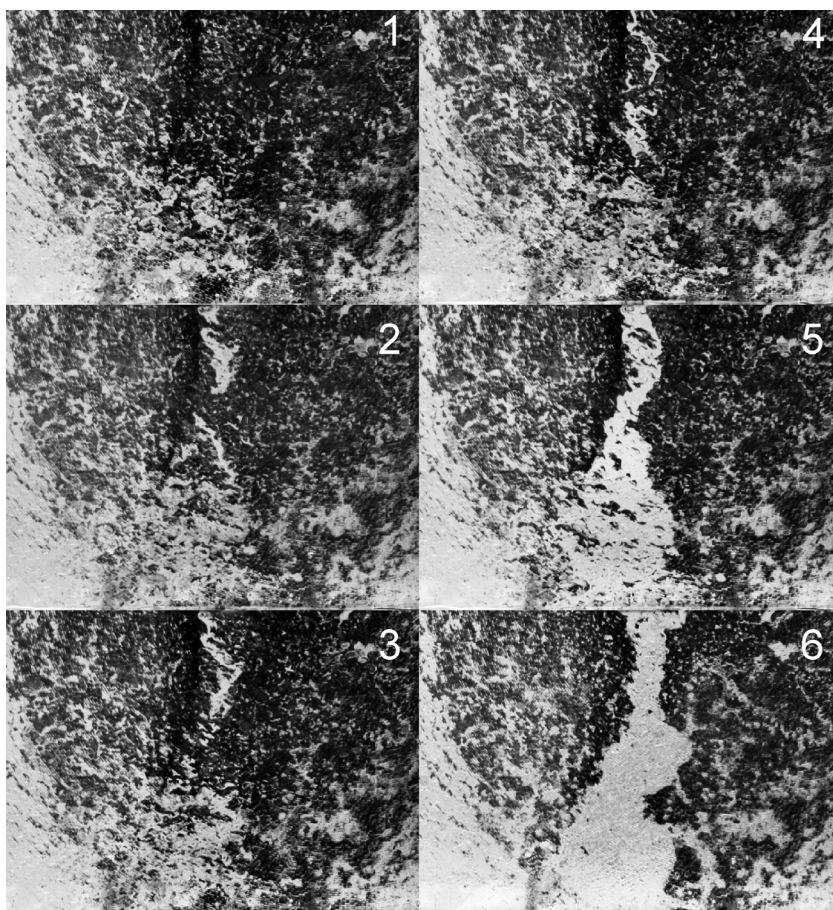


Рис. 1. Процесс декольматации щели под действием динамических импульсов (поток воды на фотографиях сверху – вниз).

Расход жидкости через трещину: 1 – 0,042 мл/с; 2 – 0,067 мл/с; 3 – 0,128 мл/с; 4 – 0,132 мл/с; 5 – 0,167 мл/с; 6 – 0,3 мл/с

В ходе эксперимента контролировался расход жидкости, проходящей через искусственную трещину, разделявшую два блока плексигласа размером $180 \times 180 \times 50$ мм, на одном из которых имелись насечки глубиной 150 мкм. Блоки были сжаты по краям струбцинами. В начале опыта через образованную щель пропускалась вода под давлением 0,5 МПа с частицами корунда размером менее 150 мкм. Постепенно вся щель заполнялась этими частицами и через некоторое время расход воды через щель стабилизировался примерно на уровне 0,04 мл/с. После того, как расход воды оставался неизменным, по крайней мере, в течение 15 минут, начинали воздействие на систему динамическими импульсами. Воздействие осуществлялось ударами стальных шаров либо по образцу, либо по мембране, гидравлически соединенной с трещиной. В первом случае по образцу распространялась упругая волна, а во втором импульс давления возбуждался в жидкости, заполняющей систему. Амплитуда воздействия контролировалась акселерометром, установленным на поверхности блока. Сразу отметим, что в целом картина изменения структуры трещины при обоих типах воздействия была примерно одинаковой.

На рис. 1 представлены последовательные фотографии образования канала в результате длительного динамического воздействия с амплитудой около 1 см/с. Можно видеть, как постепенно происходит вымывание частиц заполнителя трещины и образование канала, что приводит к радикальному увеличению расхода жидкости через трещину. Динамический градиент давления в капиллярных каналах, возникающий в результате вибрации, приводит к разрушению «барьеров», сформированных в результате слипания мелкой фракции заполнителя трещины.

В использованной постановке опыта причиной вариации расхода жидкости, протекающей через трещину, или эффективной проницаемости образца, является изменение положения частиц заполнителя под действием динамических импульсов. Можно достаточно обоснованно предположить, что закономерности динамического деформирования контактов между частицами заполнителя или между зерном и шероховатой стенкой аналогичны соответствующим закономерностям для деформирования контактов между блоками горной породы [Кочарян и др., 2004]. Тогда, воспользовавшись соотношениями, предложенными в [Кочарян и др., 2004], можно заключить, что относительное перемещение частицы при динамическом воздействии можно записать в виде:

$$\Delta \cong A \cdot \alpha \cdot t \cdot \frac{u_m}{k_s} \quad (1)$$

Здесь A – размерный параметр, определяемый физико-механическими свойствами массива и флюида, u_m – максимальная скорость смещения в волне, t – время, в течение которого осуществляется воздействие, k_s – значение жесткости контакта между частицами. Коэффициент $\alpha < 1$, зависящий от напряженного состояния контакта, учитывает, что при разнонаправленных сдвигах остаточные перемещения будут частично компенсировать друг друга. При этом интегральное перемещение будет направлено в сторону приложенной статической касательной нагрузки. Величина α будет существенно зависеть от градиента давления флюида, изменяясь, судя по результатам модельных экспериментов, в довольно широких пределах.

В самом деле, при амплитуде воздействия около 1 см/с заметное увеличение расхода воды через щель начинается в течение нескольких минут после начала вибраций (кривая 1 на рис. 3). При снижении амплитуды колебаний, равно как и при уменьшении приложенного гидростатического давления, требуемое время вибро-

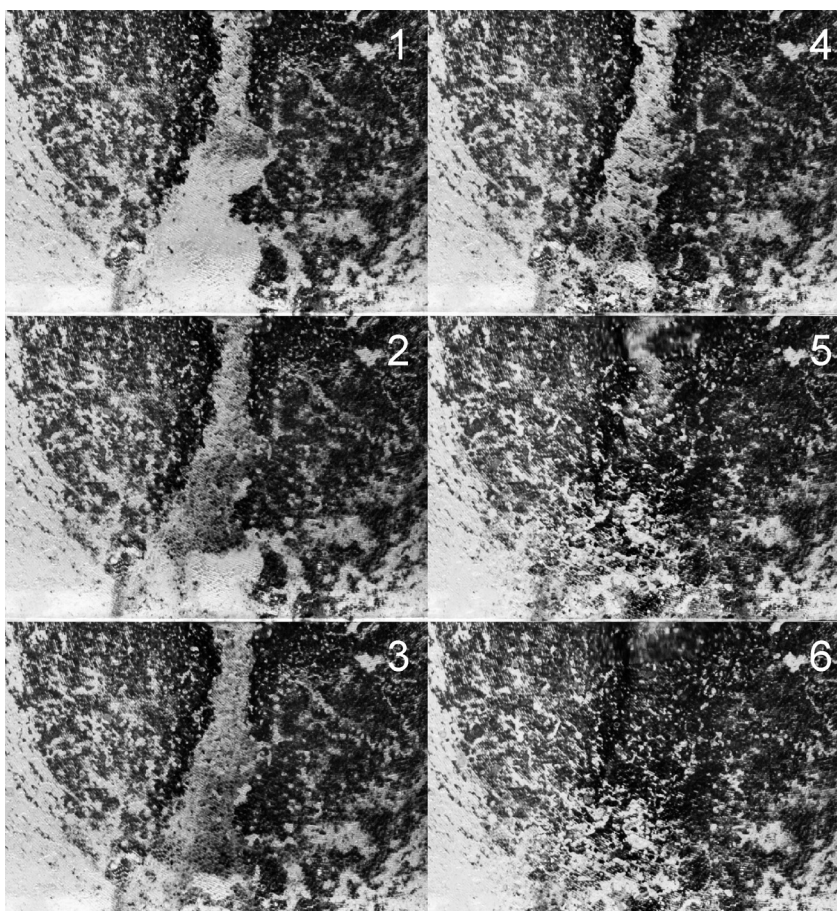


Рис. 2. Фотографии кольтации щели (поток воды на фотографиях сверху – вниз)

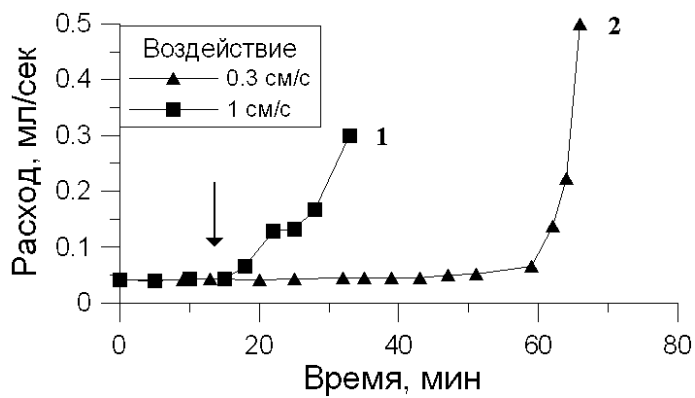


Рис. 3. Изменение расхода воды через щель при различном воздействии (стрелкой показано начало воздействия)

воздействия значительно увеличивается (кривая 2 на рис. 3). Понятно, что не требуется «накапливать» большие перемещения частиц. При наличии градиента давления частица теряет сцепление со стенками или соседними частицами уже при перемещениях, на порядок меньше характерного размера частицы. После прекращения динамического воздействия на трещину через некоторое время «разрушенные барьеры» восстанавливаются, и проницаемость образца снижается. Это хорошо видно на фотографиях, представленных на рис. 2. Время полной колюматации трещины составляло не менее 30 мин.

При повторных воздействиях, как и в случае динамического деформирования контакта между блоками горной породы [Кочарян и др., 2004], наблюдается эффект «привыкания» среды к уровню динамической нагрузки. На рис. 4 приведен сводный график изменения приведенного расхода флюида в нескольких, идущих друг за другом, сериях экспериментов. Для удобства временные разрывы между сериями опытов на графике не показаны.

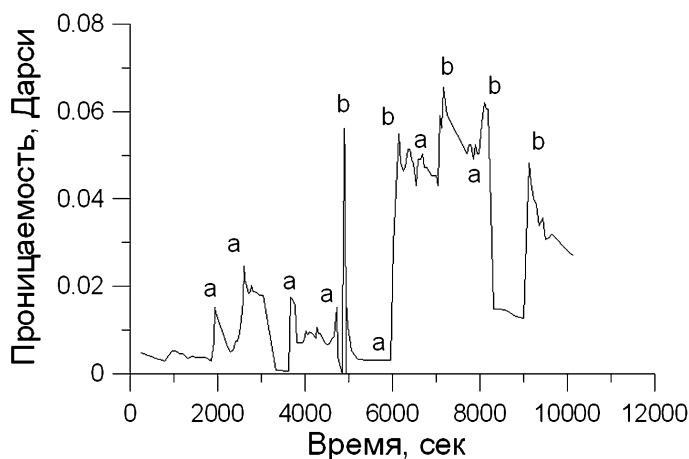


Рис. 4. Сводный график изменения эффективной проницаемости образца в разных сериях экспериментов.

Буквами обозначены участки с различной амплитудой воздействия: (a) – 2 см/с, (b) – 10 см/с

В первой сессии динамических воздействий с амплитудой 2 см/с эффективная проницаемость трещины увеличилась более чем в пять раз. После прекращения воздействия расход жидкости через трещину снизился почти до начального значения. Второе, более длительное воздействие привело к аналогичному эффекту. После окончания ударов высокий расход жидкости держался в течение примерно трех минут, после чего проницаемость трещины вновь резко снизилась, став даже заметно ниже начальной. С помощью третьего воздействия удалось вновь увеличить интенсивность потока флюида. По окончании третьего сеанса виброобработки картина стабилизировалась на значениях эффективной проницаемости образца несколько выше исходных.

Следующая серия опытов проводилась через 17 часов, в течение которых эффективное значение проницаемости практически не изменилось. Попытки динамического воздействия на образец импульсами амплитудой 2 см/с не привели к сколь-нибудь существенному изменению потока через трещину. Увеличение же

амплитуды импульса до 10 см/с привело к радикальному увеличению эффективной проницаемости образца. Аналогичные результаты наблюдались и при проведении следующих экспериментальных серий, которые продолжались, в общей сложности, около недели. По результатам экспериментов можно заключить, что возможности динамического воздействия амплитудой 2 см/с оказались исчерпанными в течение первых опытов, в то время как воздействия более значительной амплитуды (10 см/с) неизменно приводили к радикальному увеличению проницаемости трещины.

Обсуждение экспериментальных результатов

Как видно из данных, приведенных выше, для существенного увеличения проницаемости трещины, закольматированной частицами заполнителя, в лабораторных опытах потребовалось динамическое воздействие амплитудой порядка нескольких см/с. Результаты наблюдений показывают, что это значение является характерным и для природных объектов. Так, согласно опубликованным недавно результатам, сейсмическое воздействие с амплитудой 1,5–2 см/с приводит к трех-пятикратному увеличению проницаемости гранодиорита [Elkhoury и др., 2006].

Основная масса данных об остаточных изменениях уровня воды в скважинах также лежит в диапазоне изменения скоростей смещения грунта от 0,05 см/с до 10 см/с. Эти величины соответствуют деформациям порядка 10^{-7} – 10^{-5} . При таких деформациях трудно ожидать разрушения породы или прорастания трещин в результате прохождения цуга колебаний. Более вероятными представляются эффекты декольматации трещин за счет возникновения избыточного давления при прохождении сейсмического импульса [Brodsky и др., 2003], а также эффекты кумулятивного накопления межблоковых деформаций в материале-заполнителе [Кочарян и др., 2007]. Совпадение диапазонов амплитуд эффективного воздействия может быть связано с характерной прочностью «барьеров», сложенных мелкими частицами.

Оценим характерные параметры рассматриваемой проблемы. Рассмотрим скважину радиусом r , вскрывающую на длине d водоносный пласт. Пусть смещение свободной поверхности воды в скважине носит гармонический характер:

$$x = x_0 \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (2)$$

Соответственно, скорость смещения поверхности:

$$v = v_0 \cos 2\pi \frac{t}{T} = \frac{2\pi x_0}{T} \cos 2\pi \frac{t}{T} \quad (3)$$

В предположении, что радиальный поток жидкости горизонтальный и однородный, он совпадает по фазе с вертикальной скоростью смещения свободной поверхности. То есть скорость фильтрации (поток на единицу площади в единицу времени) $q(z)$

$$q(z, t) = q_0(z) \cos 2\pi \frac{t}{T} = v_0 \cos 2\pi \frac{t}{T} = \frac{2\pi x_0}{T} \cos 2\pi \frac{t}{T} \quad (4)$$

Приравнивая вертикальный и горизонтальный потоки, получаем из (3) и (4):

$$\int_0^d 2\pi r q_0(z) z dz = \pi r^2 v_0 \quad (5)$$

Предположим, что средняя скорость горизонтального потока не зависит от координаты и равна $q(t) = q_0(z) \cos 2\pi \frac{t}{T}$. Тогда, интегрируя, имеем: $2\pi r dq_0 = \pi r^2 v_0$, или, учитывая (3), получаем выражение для максимального значения скорости фильтрации:

$$q_0 = \frac{\pi x_0}{T} \frac{r}{d} \quad (6)$$

Соответственно, максимальная массовая скорость флюида есть:

$$w_0 = \frac{\pi x_0}{T} \frac{r}{d} / \xi \quad (7)$$

В соотношении (7) ξ есть просветность среды, которую в первом приближении можно заменить пористостью.

При колебании уровня с амплитудой 5 см в массиве с пористостью 5% получаем из (7) $w_0 \approx 0,5$ мм/с. Если предположить, что основные перетоки происходят по крупным трещинам, то при типичных значениях трещинной пустотности $\xi \sim 0,05\%$ имеем при $x_0 = 5$ см $w_0 \approx 50$ мм/с.

Протекающая в квазистационарном режиме по расположенным на глубине трещинам вода типично содержит 10^{10} – 10^{11} частиц микронного размера на кубический метр [Brodsky и др., 2003]. По химическому составу они обычно представляют собой водные алюмосиликаты, из которых, как известно, более чем на 50% сложена земная кора. В растворах, содержащих такие частицы в небольших концентрациях, происходят процессы агрегации – образования укрупненных структурных элементов в результате слипания отдельных частиц [Осипов и др., 2001]. Задерживаясь на отдельных участках трещины, эти коллоидные пленки формируют, так называемые, барьеры. Конгломераты коллоидных пленок обладают очень низкой проницаемостью (10^{-18} – 10^{-15} м²), сопоставимой с проницаемостью скальной породы, слагающей стенки трещин коллектора [Kessler, 1994]. Это означает, что такой барьер практически перекрывает движение флюида по трещине. Хотя такой механизм давно известен в нефтяном инжиниринге, применительно к геофизическим проблемам подобная схема впервые была рассмотрена в работе [Brodsky, 2003].

Сколько же времени требуется, чтобы сформировать барьер? Обозначим площадь поперечного сечения области осаждения частиц S , массовую скорость движения потока w , объем отдельной частицы V_1 , концентрацию частиц в воде N , объемное содержание твердых частиц в суспензии, составляющей барьер ϕ ($\sim 10\%$). Тогда время формирования барьера толщиной L можно выразить в виде:

$$t = \frac{L}{V_1} \cdot \frac{\phi}{w \cdot N} \quad (8)$$

Здесь мы для простоты предположили, что образовавшийся барьер задерживает все частицы из жидкости, фильтрующейся через его объем.

Принимая среднюю скорость движения жидкости в высокопроводящей трещине $w \sim 5 \div 10$ м/сут, оцениваем время формирования барьера толщиной 0,5 мм

$$t \sim \frac{5 \cdot 10^{-3}}{10^{-18}} \cdot \frac{0.1}{(5 \div 10) \cdot 10^{11}} \sim 500 \div 1000 \text{ дн.}$$

Скачок давления на таком барьере с коэффициентом фильтрации $K \sim 5 \cdot 10^{-7}$ м/с составляет величину:

$$\Delta P = \frac{L \cdot \rho \cdot g}{K} w \cong 0,6 \div 1,2 \text{ КПа} \quad (9)$$

Таким образом, устранение барьера может привести к заметному изменению порового давления.

Реологические свойства коллоидных суспензий обычно описывают законами, соответствующими неньютоновским жидкостям, обладающим пределом прочности τ_c , например реологическим законом Бингама:

$$\tau = \begin{cases} \chi \cdot \dot{\gamma}, & \tau < \tau_c \\ \tau_c + \chi \cdot \dot{\gamma}, & \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (10)$$

Здесь τ – величина сдвиговых напряжений, χ – параметр, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

Для того, чтобы началось течение, сдвиговые напряжения должны превысить величину τ_c . Этот параметр сильно зависит от объемного содержания в суспензии твердых частиц θ . Судя по результатам экспериментов, описанных в [Coussot, 1995], при концентрациях твердых частиц порядка 10%, предел прочности суспензии составляет доли Паскаля. Несколько большие величины – порядка первых Па – дают результаты исследований реологии буровых растворов, например, [Петров и др., 2007]. Оценка характерной прочности тонкодисперсного глинистого грунта дает величину 0,1–10 Па [Осипов и др., 2001].

При движении жидкости в трещине вязкое напряжение на коллоидальной частице есть приблизительно

$$\tau \approx \eta W / \rho, \quad (11)$$

где η – вязкость воды (10^3 Па с), ρ – радиус коллоидальной частицы (1 мкм).

Таким образом, величина прочности $\tau_c \sim 1$ Па достигается при скорости потока $w_c \sim 1$ мм/с.

Согласно соотношению (7) скорость потока, возбуждаемого в трещине при сейсмическом воздействии, пропорциональна амплитуде колебаний порового давления ΔP и обратно пропорциональна средней пористости. Понятно, что скорость потока в каждой конкретной трещине w_T будет зависеть от ее апертуры b и максимальной массовой скорости движения грунта u_m .

Записывая скорость течения жидкости в трещине и рассчитывая напряжения согласно (11), получаем условие разрушения барьера:

$$\eta \cdot \frac{b^2}{12 \mu} \frac{\partial P}{\partial x} / \rho \geq \tau_c \quad (12)$$

Таким образом, при фиксированном скачке порового давления (максимальной скорости смещения грунта) критическая прочность будет достигнута в трещинах с раскрытием больше величины $b_c \sim u_m^{-0.5}$. Это означает, что в более тонких трещинах барьеры разрушаются реже, соответственно, дольше идет процесс накопления осадков и барьеры имеют большую толщину. Разрушение более мощных барьеров приводит, в соответствии с (9), к большему скачку напора и, в конечном итоге, пропорциональному увеличению вариаций уровня.

Заключение

Проведенные простые эксперименты продемонстрировали возможность разрушения «барьеров», сформированных мелкими глинистыми частицами при воздействии импульса давления. Показано, что динамические воздействия, даже малой амплитуды, могут приводить к изменению количества открытых трещин и их проницаемости. Это приводит к миграции флюидов, вариациям порового давления, а, следовательно, и всей гаммы механических характеристик локального участка массива. Экспериментально установлена возможность постепенного накопления эффекта при длительной виброобработке.

Рассмотренная схема декольматации находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными, приведенными в первой части настоящей работы [Кочарян и др., 2010]. Важным представляется установленный факт пропорциональности скачка напора корню квадратному из максимального значения скорости смещения грунта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-05-12023 ОФИ-м) и ОНЗ РАН (программа №6).

Литература

Кочарян Г.Г., Бенедик А.Л., Костюченко В.Н., Павлов Д.В., Перник Л.М., Свинцов И.С. Опыт воздействия на трещиноватый коллектор низкоамплитудными сейсмическими колебаниями // *Геоэкология*, 2004, № 4, С. 367–377.

Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М. Изменение флюидодинамического режима подземных коллекторов под действием сейсмических колебаний. Часть 1. Анализ результатов наблюдений (настоящий сборник).

Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // *Физическая мезомеханика*. 2004, т. 7, № 1. С. 5–22.

Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. О механизме вариаций флюидодинамического режима подземных коллекторов под действием слабых возмущений. // *Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН*. М.: ГЕОС. 2007, с. 56–65.

Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. М.: Наука, 2001. 238 с.

Петров Н.А., Коренько А.В., Давыдова И.Н., Комлева С.Ф. Обработка бурового раствора при бурении скважин с горизонтальным окончанием // *Нефтегазовое дело*, 2007, <http://www.oqbus.ru/>.

Brodsky E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained ground water pressure changes induced by distant earthquakes. // *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, P. 2390–2400.

Cooper H.H., J.D. Bredehoeft, I.S. Papadopoulos, and R.R. Bennett. The response of well-aquifer systems to seismic waves, // *J. Geophys. Res.*, 1965, vol. 70, P. 3915–3926.

Coussot P. (1995), Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for clay-water suspensions // *Phys. Rev. Lett.*, 74, p. 3971–3974.

Elkhoury J.E., Brodsky E.E. and D. Agnew. Seismic waves increase permeability // *Nature*, 2006, vol. 441, P. 1135–1138

Kessler J., Hunt J. Dissolved and colloidal contaminant transport in a partially clogged fracture // *Water resources research*, 1994, Vol. 30, #4, p. 1195–1206.