

УДК 622.7:534

**ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАССИВА  
В ВОСХОДЯЩЕМ КАПИЛЛЯРНОМ ДВИЖЕНИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ  
ПРИ ВИБРАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

**А. Г. Михайлов, А. Е. Зуев, А. И. Вашлаев**

*Институт химии и химической технологии СО РАН,  
E-mail: chem@icst.ru, Академгородок, 50, стр. 24, 660036, г. Красноярск, Россия*

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию вибрационно-акустической обработки на фильтрационные свойства массива при направленном восходящем движении водных растворов. Для условий песчаного массива узкого класса крупности получены зависимости интенсификации скорости фильтрации на разных уровнях звуковой нагрузки в совокупности с разным градиентом давления. Экспериментально установлена возможность многократного повышения скорости капиллярной фильтрации при направленном восходящем движении водных растворов.

*Массив, капилляры, восходящая фильтрация, вибрационно-акустическая обработка, звуковое давление*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200417

---

Капиллярная фильтрация минерализованных растворов в массиве является важным процессом преобразования вещественного состава в недрах, играя главную роль в миграции элементов с изменениями концентраций и соединений. Данный геологический процесс сформировал большинство крупных, средних и мелких месторождений различных полезных ископаемых [1]. В основе капиллярного движения флюидов в массиве лежит теория равновесия статических и динамических составляющих закона фильтрации (закон Дарси). К нему добавлена кинематическая составляющая фильтрационного потока Ж. Дюпюи. До сих пор это служит инструментом расчетов фильтрационного потока жидкости в пористых средах и остается главным инструментом, несмотря на расхождения расчетных и экспериментальных значений в условиях движения жидкости по капиллярам (например, глинистый материал). Этот инструментальный метод физического счета абсолютно не учитывает контактное физико-химическое взаимодействие фаз в процессах фильтрационного выщелачивания [2]. Широкий класс жидкостей органической, биологической природы обнаруживают свойство менять скорость движения в пористых средах вследствие снижения вязкости под действием внешней нагрузки.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-45-242001).

Известны факты кратного увеличения скорости капиллярной фильтрации вязких флюидов в акустическом поле [3]. Исследования, связанные с воздействием упругих волн на нефтяные коллекторы месторождений, начались после Калифорнийского землетрясения 1952 г. К настоящему времени практическое применение волновой обработки коллекторов и устьевых областей нефтяных скважин стало нормой. Изучение воздействия волновых колебаний позволяет применить эффект снижения вязкости в акустическом поле для интенсификации направленного фильтрационного потока в капиллярах массива [4]. Установлено, что при физическом воздействии на массив происходит радикальное повышение капиллярной фильтрации вязких жидкостей (нефти) при неизменном градиенте давления [5].

Колебания скоростей фильтрации отмечены не только для вязких флюидов. Повышенная скорость движения жидкости обнаруживается и для почвенной воды при ее движении по капиллярам деревьев [6]. Такое свойство называют явлением сверхтекучести. При этом считается, что вязкость почвенной воды сопоставима с обычной свободной водой. Расчетная скорость в этих случаях для капиллярного потока находится в пределах  $\approx 2 \cdot 10^{-3}$  м/с по капиллярам диаметром 7–14 мкм, что соответствует градиенту давления  $\sim 1.1$  МПа/м, тогда как реально он составляет  $\sim 20$  кПа/м.

Причиной сверхтекучего отклонения считаем эффект скольжения раствора по ионизированной поверхности капилляров. В [7] экспериментально установлено 3–5-кратное повышение скорости движения водных растворов в слое механически активированного кварцевого песка. В качестве причины выдвигается электростатическая гипотеза эффекта сверхтекучести водных растворов в область механически активированных поверхностей капилляров пористой среды. Наряду со свойствами контактирующей поверхности капилляров на кинетику движения жидкости оказывают влияние и свойства самой жидкости. При выщелачивании неоднократно отмечалось влияние внешних физических воздействий на переменность фильтрационных свойств обрабатываемого массива [8]. Ее состояние и структура определяют сопротивление движению (вязкость). Учитывая, что, возможно, флюид представляет кластерное структурное образование, а один кластер может включать до 500 тыс. молекул [9], то свойства текучести определено должны зависеть от структуры флюида.

Биологическими исследованиями Института биологических проблем криолитозоны СО РАН установлено, что для условий разных интенсивностей воздействий (акустических колебаний и поляризованного света) вода приобретает ту или иную соразмерную воздействию степень структурированности [10]. Большие проблемы методического и технического плана возникают при определении значений вязкости воды и водных растворов в пористых проницаемых средах при наличии быстрых внутрискрутурных преобразований. Недостаточный объем целенаправленных экспериментальных исследований, по-видимому, является причиной отсутствия новых теоретических моделей и методов численного моделирования кинетических и реакционных явлений при фильтрации водных растворов в сложных проницаемых средах.

Изучение и учет свойств акустической интенсификации массопереноса может представлять собой основу для выработки технологических решений по осуществлению селективного направленного ускорения переноса одних компонентов и торможения других. Капиллярный поток — весьма сложный неоднозначный процесс для разных условий как поверхности капилляров, так и свойств растворов.

Результаты экспериментов по восходящему капиллярному подъему растворов при направленном выщелачивании поликомпонентного минерального сырья из хвостов обогащения подтверждают неоднозначность теории капиллярной фильтрации. Варианты экспериментов проводились на лабораторном стенде, представляющем собой вертикальную колонну высотой 1500 мм, диаметром 110 мм [11]. Подача воды осуществлялась в колонну снизу.

Получены экспериментальные данные по кинетике вертикального капиллярного подъема растворов при постоянной подаче исходной воды с удалением продуктивных растворов как с поверхности, так и через отводы по высоте. В продуктивном растворе контролировали содержание элементов Cu, Ni, Co, Fe, Mg, Pt, Pd, Au. Отмечено, что за весь период экспериментального цикла средняя скорость фильтрации достаточно близка к расчетным значениям безнапорного движения флюидов в рыхлом массиве с капиллярами радиусом 0.006 мм и с показателями вязкости, близкими к вязкости воды при комнатной температуре в условиях влажности ~ 60 %. Однако первая половина экспериментального периода характеризуется значениями выше расчетных с разбросом показаний от 10 до 250 %. Вторая половина в среднем характеризуется относительным снижением скорости фильтрации, но скорость фильтрации выше средней расчетной примерно от 10 до 120 %. Динамика скорости фильтрации приведена на рис. 1.

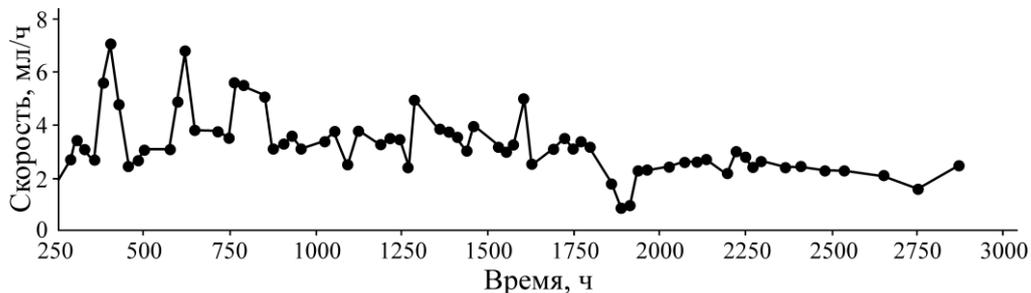


Рис. 1. Скорость вертикально восходящего движения раствора в экспериментальной колонне

Фильтрационная нестабильность течения флюидов по капиллярам с колебаниями более чем двукратного значения от средней теоретически расчетной величины может быть обоснована периодической локализацией с равномерно распределенного на распространенный механизм течения с фокусировкой по каналам. Водные растворы, фильтрующиеся через пористую породу и реагирующие с ее минеральными компонентами, используют существующие и формируют новые каналы в массиве, многократно превышающие размер капилляров. По мере продвижения активных растворов из-за их реакционного действия инфильтрационная нестабильность кинетики потока приобретает характерную зубчатую форму. Пористость массива в процессе капиллярного выщелачивания повышается. Повышенная пористость участков массива обуславливает локальное повышение скорости движения флюидов. Это приводит к увеличению контакта раствора с минералом массива и, соответственно, к скорости реакции растворения минералов. Далее растет локальное увеличение проницаемости, что в свою очередь, вызывает ускорение движения реакционного фронта в процессе выщелачивания.

Локальное увеличение потока приводит к его захвату из близлежащих зон массива. Реакционный фронт затухает при снижении активности раствора или отсутствии минеральных компонентов массива. Кроме того, во время движения растворов по сформированным каналам частично растворенная минеральная фаза переходит, осаждаясь, в твердую фазу и образует отложения, не исключая полного перекрытия живого сечения капилляров отдельных участков. О присутствии эффекта кольматации свидетельствуют данные эпизодического снижения скорости движения растворов в массиве и изменение их минерализации на разных горизонтах массива и во времени. Снижение скорости капиллярного течения растворов, по данным эксперимента, не превышает 25 % от среднего значения, причем, как правило, сразу после пика снижения.

Очевидна многофакторность в кинетике капиллярной фильтрации, причем в разных условиях сложно однозначно оценить предпочтительность одного или группы факторов. Для конкретных целей целесообразно иметь соответствующие характеристики фильтрационных свойств массива,

что предопределяет экспериментальную корректировку скорости фильтрационного потока в каждом массиве. Для получения части корректировочных коэффициентов проведены экспериментальные исследования фильтрации водных растворов в вибрационно-акустическом поле.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования вибрационно-акустической обработки массива проведены на специально разработанной установке восходящего капиллярного подъема раствора снизу вверх к поверхности. Она включает в себя (рис. 2) емкость из поликарбоната, заполненную фильтрационным материалом. Длина 1 м, высота 0.15 м и ширина 0.1 м. Установка разделена на три равных канала. Перегородки служат для исключения перелива растворов по поверхности из одной части канала в другой.

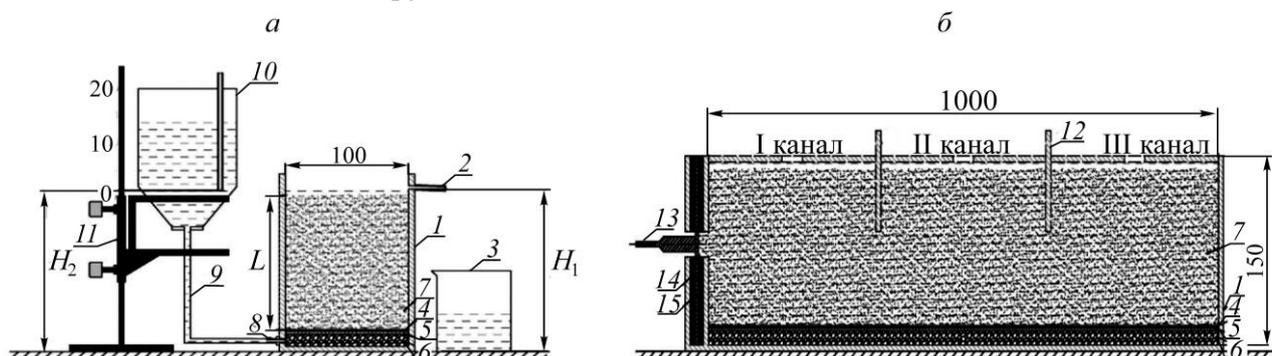


Рис. 2. Общий вид лабораторно-фильтрационной установки (а) и продольный разрез фильтрующей части (б): 1 — корпус установки; 2 — слив фильтрата; 3 — мерный стакан; 4, 5 — комплект сеток; 6 — гравий; 7 — фильтрационный слой; 8 — запорная арматура; 9 — шланг; 10 — сосуд Мариотта; 11 — телескопическая стойка; 12 — перегородка; 13 — импульсный генератор; 14, 15 — мембрана передачи импульсов в массив;  $L$  — длина пути фильтрации (толщина слоя песка)

Для равномерного питания всей площади (объема) на дно емкости уложен гравий с комплектом сеток с размером ячеек от 0.4 мм до 100 мкм. Фильтрационный материал — кварцевый классифицированный песок  $-0.4 + 0.2$  мм, имеющий пористость, представлен на рис. 3.

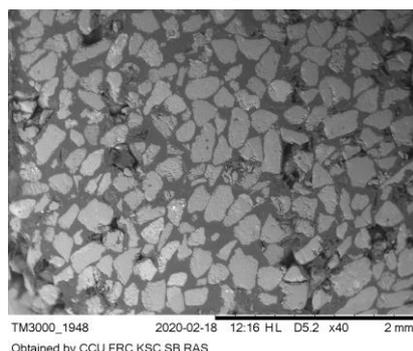


Рис. 3. Фильтрационный массив в экспериментальной установке

Равномерная подача раствора снизу осуществляется через сосуд Мариотта на телескопической стойке по трем шлангам для каждого канала, длина шланга составляет 2.5 м. Диапазон изменения напора (градиент давления) равен 2 м. Вибрационно-акустическое поле формирует импульсный перфоратор через металлическую мембрану с торца установки со стороны первого канала.

Для измерений вибрации и звукового давления использовали анализатор звука. Он позволяет измерить средние (эквивалентные), экспоненциально усредненные и пиковые уровни в диапазонах звука, инфразвука и ультразвука; уровень звукового давления (УЗД) в октавных и третьоктавных полосах частот в диапазонах звука, инфразвука и ультразвука; скорректированные уровни виброускорения общей и локальной вибрации и уровни виброускорения в октавных и третьоктавных полосах частот в диапазонах общей и локальной вибрации.

Экспериментальный период включал атмосферный контроль, в частности температуру, атмосферное давление и влажность воздуха. Температура подающих растворов соответствовала температуре окружающей среды. Эксперимент разделен на пять этапов, на каждом определялась кинетика восходящей фильтрации для четырех уровней пьезометрического напора в каждом канале фильтрации установки.

На первом этапе проведена серия опытов без виброакустического воздействия на массив песка при насыпной плотности (без уплотнения). Каждый экспериментальный цикл осуществлялся после стабилизации течения. На втором, третьем и четвертом этапах массив подвергался постоянному вибрационно-акустическому воздействию. В каждом цикле контролировались изменения уровня внешнего воздействия и состояние массива. На пятом этапе эксперименты выполнялись без воздействия виброимпульсов на массив в условиях уплотненного состояния массива после предыдущих серий экспериментов.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе экспериментально дана оценка фильтрационной способности материала массива при восходящем движении раствора. Фильтрация в стандартных условиях находится в соответствии с законами Дарси с кинематической составляющей потока Ж. Дюпюи. Зависимость практически линейная (рис. 4а).

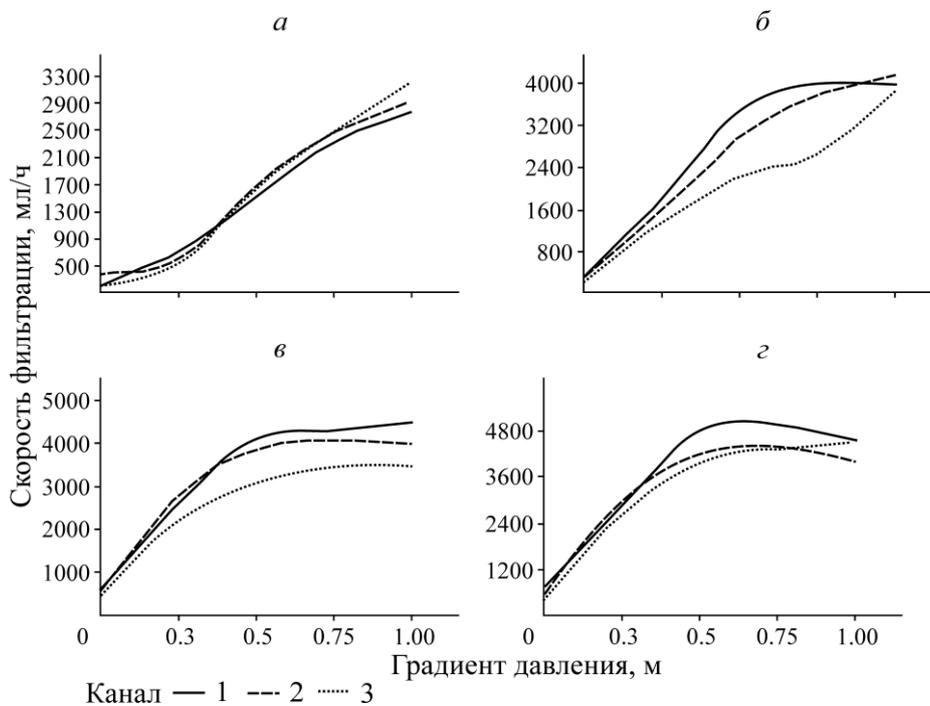


Рис. 4. Зависимость скорости фильтрации от градиента давления в каналах установки (а); при виброакустической обработке в диапазоне давления 40–60 дБ (б); 70–80 дБ (в); ~110 дБ (г)

В результате приложения виброакустического воздействия в массив характер зависимости фильтрации от градиента давления меняется. В режимах с относительно низким акустическим давлением и преобладанием инфразвуковой акустической составляющей наблюдается повышение скорости фильтрации при невысоких градиентах давления на начальном уровне подачи раствора. Зависимость нелинейная с выполаживанием кривой при уровне подачи  $\sim 0.8$  м. На максимальном уровне градиента давления при неизменном уровне акустического давления скорость фильтрации практически сопоставима со скоростью фильтрации без акустической обработки (рис. 4а).

На следующем этапе с виброакустической обработкой массива с более интенсивным звуковым давлением (рис. 4б) общий характер зависимостей изменения скорости фильтрации мало чем отличается от предыдущего этапа. В области градиента давления подачи раствора, близкого к 0.5 м, происходит выполаживание кривой по всем каналам. Скорость фильтрации остается практически неизменной и при дальнейшем росте градиента давления.

С увеличением вибрационно-акустической нагрузки до уровня 110 дБ отмечается рост скорости фильтрации на начальном этапе увеличения градиента давления подачи. До значения градиента давления  $\sim 0.5$  м происходит линейный рост скорости фильтрации (рис. 4в), далее, с увеличением вибрационно-акустической нагрузки, скорость фильтрации практически не меняется. Более того, в первых двух каналах наблюдается снижение на 10–15 % от максимального значения в области относительно повышенного градиента давления. Только в последнем третьем канале скорость фильтрации с отставанием растет также на 10 %.

Скорость фильтрации для параметров массива капиллярами узкого класса песка, по всей видимости, обладает предельными значениями для фактора вибрационно-акустического поля (5000 мл/ч). Для четвертого этапа эксперимента следует отметить существенные возможности интенсификации фильтрации для относительно низкого уровня вибрационно-акустической нагрузки (до 60 дБ) с высокой долей, до 40 % спектра инфразвуковой составляющей. В этой области волновой нагрузки скорость фильтрации может быть повышена практически на порядок. На пятом этапе экспериментальной серии протестирована скорость фильтрации без вибрационно-акустической нагрузки. Под воздействием вибрации материал массива в установке уплотнился в пределах первых процентов от начального объема (от 7 % объема в первом канале до 11 % в третьем канале). Изменения скорости фильтрации приведены на рис. 5.

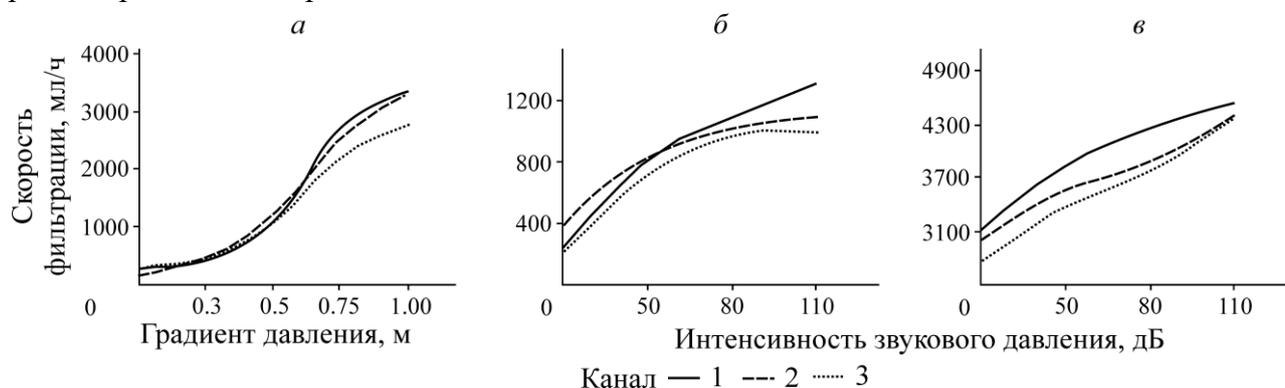


Рис. 5. Зависимость скорости фильтрации от градиента давления в каналах установки после циклов вибрационно-акустической обработки (а); от уровня звукового давления в каналах установки без градиента давления (б); от уровня звукового давления в каналах установки при максимальном для установки градиенте давления (в)

В связи с уплотнением проницаемость массива, очевидно, снизится. Средний размер пор массива не изменится, поскольку крупность частиц осталась прежней. Частичное перекрытие капилляров является основной причиной снижения скорости фильтрации. Влияние вибрационно-акустической обработки — один из факторов интенсификации скорости фильтрации. Насколько значителен этот фактор, можно судить по изменению влияния интенсивности звукового давления (рис. 5б). Скорость фильтрации в вибрационно-акустическом поле может быть повышена почти в 3 раза при увеличении звукового давления. При максимальном градиенте давления подачи раствора (рис. 5в) прирост скорости фильтрации значительно ниже, чем при отсутствии, и составляет 20–30 %.

### ВЫВОДЫ

Проведенная серия экспериментальных исследований подтверждает влияние вибрационно-акустического фактора на фильтрационные свойства массива. Этот фактор — один из интенсифицирующих скорость направленной фильтрации растворов в массиве. Вибрационно-акустическая обработка массива позволяет дополнить градиент давления в интенсивности капиллярного движения растворов. Интенсифицирующее дополнение весьма существенно в области низких значений градиента давления. Так, за счет вибрационно-акустической обработки при градиенте давления до 0.3 м скорость капиллярного подъема раствора может быть повышена в 3–5 раз. Следует учитывать, что с ростом градиента давления уровень повышения скорости восходящей фильтрации снижается. При градиенте 1.0 м дополнение в скорости фильтрации составляет лишь 20–30 % от уровня скорости нулевого градиента давления. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что существует предел вибрационно-акустического влияния на скорость фильтрации. Для условий капилляров в массиве узкого класса песчаной фракции, используемого в экспериментальном массиве, предельные значения скорости фильтрации находятся в области 4000–5000 мл/ч в зависимости от уровня звукового давления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых: учебник для вузов. — М.: Недра, 198. — 326 с.
2. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. — М.; Ижевск, 2004. — 628 с.
3. Есипов И. Б., Зосимов В. В., Матвеев К. И. Распространение акустического импульса конечной амплитуды в гранулированной среде // Акуст. журн. — 1997. — Т. 43. — № 3. — С. 654–660.
4. Пирогов В. А., Тартаковский Б. Д. Трехслойная согласующая система для границы с комплексным импедансом // Акуст. журн. — 1971. — Т. 17. — № 2. — С. 258–262.
5. Губайдулин А. А., Конев С. А., Саранчин С. Н. Экспериментальное исследование вибро-акустического воздействия на фильтрацию углеводородных систем в пористых средах // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Всерос. науч.-техн. конф. — 2009. — Т. 1. — С. 70–72.
6. Ходаков Г. С. Сверхтекучесть почвенной воды в капиллярной системе растений // Рос. хим. журн. — 2007. — Т. LI. — № 3. — С. 172–176.
7. Редькин Н. И., Ходаков Г. С. Эффект сверхтекучести водных растворов в поровых капиллярах при обычных температурах // Рос. хим. журн. — 2002. — Т. XLVI. — № 3. — С. 39–50.

8. **Чантурия В. А., Миненко В. Г., Самусев А. Л., Рязанцева М. В., Чантурия Е. Л., Копорулина Е. В.** Влияние ультразвуковых воздействий на эффективность выщелачивания, структурно-химические и морфологические свойства минеральных компонентов эвдиалитового концентрата // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 114–121.
9. **Зенин С. В., Полануер Б. М., Тяглов Б. В.** Экспериментальное доказательство наличия фракций воды // Гомеопат. медицина и акупунктура. — 1997. — № 2. — С. 42–46.
10. **Хлебный Е.С.** Живое и неживое. // Вещественные и энергетические взаимодействия: материалы Первого Тихоокеан. симп. — Владивосток: Из-во ДВГТУ, 2008. — С. 28–29.
11. **Михайлов А. Г., Харитонов М. Ю., Вашлаев И. И., Свиридова М. Л.** Способ формирования техногенного месторождения путем накопления полезных компонентов // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 150–155.

*Поступила в редакцию 13/V 2020*

*После доработки 07/VII 2020*

*Принята к публикации 09/VII 2020*