

ПОСТСЕДИМЕНТАЦИОННАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ В НАЗЕМНЫХ ОСАДКАХ. МОДЕЛЬ ЖЁСТКОЙ МАТРИЦЫ

А.Г. Зубов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, (zubov@kscnet.ru)

Эксперименты По данным проведения автором эксперимента по смачиванию осадков в присутствии геомагнитного поля (ГМП) было выявлено [1]:

1. Появление постседиментационной остаточной намагниченности (PDRM) при замачивании образцов почв в присутствии ГМП.
2. Разрушение в значительной степени этой PDRM при высушивании тех же образцов без поля.
3. Разрушение при том же замачивании лабораторной вязкой намагниченности, накопившейся ранее в образцах супеси.

Если первый вывод ожидался, то остальные казались непонятными. Эти результаты позволили сделать следующие обобщения:

1. Процесс формирования PDRM при смачивании обладает квазиобратимостью.
2. Процесс смачивания влияет на другие компоненты естественной остаточной намагниченности.
3. Вышеперечисленные свойства можно очень эффективно использовать для магнитной чистки нового типа.
4. При проклеивании образцов во время отбора возможно приобретение техногенной PDRM.
5. Эти знания можно использовать для профилактики техногенных PDRM, могущих возникать при неконтролируемых изменениях влагосодержания в образцах осадков (то есть при увлажнении или высушивании образцов).

В литературе можно найти описания и других экспериментов с изменением влагосодержания образцов. Ближе всего к уже описанному эксперименты С.А. Писаревского [2], в которых подвергались смачиванию естественные образцы наземного происхождения. Кроме доказательства образования PDRM в результате смачивания к важным результатам эксперимента можно отнести также экспериментальное доказательство устойчивости (стабильности) этой PDRM при проведении стандартных магнитных чисток. Причина образования PDRM в этой работе объясняется вовлечением частиц в движение потоками воды при смачивании. Поскольку результат связывается со скоростью потоков, можно предположить, что в процессах вовлечения частиц подразумевалась работа механизма вязкого трения. В экспериментах P.C. Henshaw и R.T. Merrill [3] была выявлена PDRM, возникавшая при высушивании донных и искусственных осадков.

Модель Для объяснения обсуждённых свойств PDRM была придумана «модель жёсткой матрицы». Понятие «матрица» существует давно и означает оно среду, субстанцию, которая окружает исследуемые магнитные частицы. Матрица задаёт правила поведения магнитных частиц в переходных процессах или удерживает их в стационарных состояниях. Часто можно встретить сочетание «немагнитная матрица», то есть задаётся разделение на магнитные

частицы и немагнитное окружение. В нашем случае матрица может состоять из любых частиц. Только наша «жёсткая матрица» это каркас и состоит из относительно жёстко связанных частиц, а остальные частицы связаны с ней и друг с другом относительно слабо. Слово «относительно» означает, что деление всех частиц осадка на частицы из матрицы и вне матрицы условное и зависит от энергетики изучаемых механизмов воздействий. Слово «жёсткая» означает «недеформируемая», то есть любая часть описываемого пространства должна сохранять локальный объём и форму. В деформируемой при сильном воздействии матрице будет происходить трудно описываемое групповое контактное взаимодействие частиц. Ограничивая себя жёсткой матрицей, мы упрощаем задачу, сводя её к взаимодействию только одной частицы с матрицей. Но именно жёсткая структура каркаса матрицы более всего подходит для описания большинства видов слабо консолидированных устоявшихся (прошедших начальное уплотнение) наземных осадочных пород.

В рамках этой модели схема участия магнитных частиц при образовании PDRM выглядит таким образом:

исходное закреплённое состояние → отрыв от матрицы в результате рассматриваемого механизма воздействия → свободное бесконтактное состояние и ориентирование по полю → закрепление частицы в недрах матрицы с частично сохранённой ориентацией.

Исходное состояние для частиц постулируется как закреплённое, что обычно бывает в наземных неводонасыщенных осадках, где при дефиците влаги частицы контактно связаны друг с другом. Эта модель может подойти и для описания процессов в некоторых видах донных осадков, магнитные частицы в которых могут участвовать в вышеуказанной схеме. Скорей всего сюда подходят осадки с относительно грубым гранулометрическим составом, и не подходят осадки с коллоидным заполнением.

Подобно тому, как это реализовано в теории диаграммы Прейзаха, сопоставим каждой частице пороговые параметры для перехода из одного состояния в другое. У Прейзаха это были параметры «а» и «b» – пороговые величины полей переворота домена «туда» или «обратно». Для наших частиц это будет одна величина – «порог срыва». Этот порог означает предельную величину параметра воздействия, при превышении которого у частицы разрываются контактные связи с матрицей и она становится на время свободной. Параметр воздействия может быть разным в зависимости от удобства решаемой задачи. Это может быть сила, момент количества движения, энергия. Соответственно и порог срыва может быть скалярной или векторной величиной, и в последнем случае это затрудняет задачу. Для упрощения можно свести векторные «пороги срыва» к неким эффективным скалярным (величина вектора), подразумевая, что при конкретном механизме воздействия на конкретную частицу реализуется одно направление воздействия.

Если порода испытала некое воздействие, то частицы, имеющие порог срыва меньший, чем параметр воздействия для данного типа частиц, оторвутся и по приведённой схеме станут участниками образования PDRM. Не будем детализировать поведение частиц после срыва. Очень многие свойства PDRM можно получить даже при анализе только процессов срыва.

Из тех условий, которые были здесь сформулированы уже можно получить первые результаты. Но для начала требуется сделать одно предположение, которое трудно доказать аналитически, но на уровне здравого смысла оно кажется приемлемым. Заметим, что в теории Прейзаха повторные воздействия поля предположительно несущественно меняют конфигурацию плотности распределения частиц на диаграмме, или иначе проведённое полевое воздействие не сильно изменяет параметры «а» и «б» участвовавших в процессе частиц. Так и в нашем случае предполагается, что сорванные частицы закрепятся с порогом срыва близким предшествовавшему. Это значит, что при следующем и дальнейших воздействиях того же типа будут участвовать один и тот же ансамбль слабо связанных частиц, а значит при каждом воздействии старая PDRM полностью разрушается и возникает новая такой же величины. Эта особенность является основой для объяснения свойства **обратимости** PDRM.

С другой стороны существует некоторая вероятность, что сорванная частица случайно заблокируется в недрах пор настолько, что не будет дальше участвовать в посториентационных процессах того же уровня. Или иначе частица приобретёт новый порог срыва, недоступный для данного вида воздействия. Все такие частицы законсервируют какую-то долю PDRM. Возможно также, что сорванные с места частицы сделают доступными для дальнейшего участия нижележащие слои частиц, то есть одни частицы после воздействия снизят порог срыва других. Таким образом, участвующий в посториентационных процессах ансамбль слабосвязанных частиц каждый раз частично обновляется. А это основа для объяснения **неполноты** обратимости PDRM. Для полного объяснения свойства квазиобратимости PDRM в описанном выше эксперименте не хватает доказательства эквивалентности (одинакового уровня) воздействия смачивания и сушки в посториентационных процессах. Для этого необходимо будет детальнее рассмотреть механизмы воздействий.

Объяснить причину частичного разрушения лабораторной вязкой компоненты, образовавшейся при хранении образцов супеси после проведённой магнитной чистки, в рамках модели жёсткой матрицы теперь кажется несложно. Носителями этой лабораторной вязкой компоненты несомненно были все магнитные частицы, в том числе и те, которые приняли участие в посториентационных процессах. Но последние при воздействии смачивания переориентировались, создав PDRM. Эта переориентация и разрушила несомую этими частицами долю вязкой компоненты. Этот эффект был обнаружен именно на вязкой компоненте, но очевидно, что процесс разрушения мог затронуть любые компоненты, несомые ансамблем частиц, участвовавших в посториентационных процессах. В том числе и долю первичной ориентационной, чего бывает жаль, а также возможную химическую, что полезно в большинстве случаев. Про химическую намагниченность здесь говорится не случайно, поскольку на начальном этапе зёрна-носители её мелкие и есть надежда, что и закреплены они слабо по отношению к уровню срывающих воздействий.

Причина стабильности PDRM, доказанная Писаревским [2], тоже понятна, если учесть малые размеры частиц-участников постседиментационного процесса. Известно, что коэрцитивность частиц с размерами, близкими к

однодоменным очень высока, а температура Кюри не является структурно-чувствительным параметром. Правда, очень мелкие частицы при температурной чистке размагничиваются раньше из-за пониженных в силу малого объёма блокирующих температур.

Возможные механизмы срыва. Броуновское движение Это очевидно самое слабое воздействие. Естественно рассматривать работу этого механизма в водной среде. По нашим постулатам начальное состояние частиц — закреплённое. Существует некоторая вероятность, что в результате броуновского движения слабо закреплённая частица будет выбита из состояния закрепления и станет на время свободной. А далее по вышеприведённой схеме она внесёт свой небольшой вклад в формирование PDRM. Динамику роста PDRM будет определять именно вероятность срыва частицы, а не последующие этапы, поскольку эта вероятность невелика, и это регулирует весь процесс. Нетрудно догадаться, что у этой PDRM должен наблюдаться медленный временной рост и зависимость скорости роста от температуры среды. Это напоминает по свойствам вязкую намагниченность. Отличие же в том, что эта PDRM гораздо более стабильна при стандартных магнитных чистках, а также зависит от наличия водной среды. Рост PDRM можно прекратить высушиванием или замораживанием образцов. Хранение образцов в охлаждённом состоянии позволяет снизить накопление этой помехообразующей намагниченности. PDRM, образуемая по этой модели, без более подробных расчётов временных зависимостей роста трудно отличить от классической PDRM, моделируемой медленными доворотами частиц по полю в полужидком осадке.

Лабораторную намагниченность, похожую по свойствам на вязкую, удалось выявить В.В. Кочегуре [4]. Далее рассмотрим механизмы, связанные с внутривидовым движением воды в осадке, что характерно за редкими исключениями только для наземных осадков. Анализ проиллюстрирован рисунком.

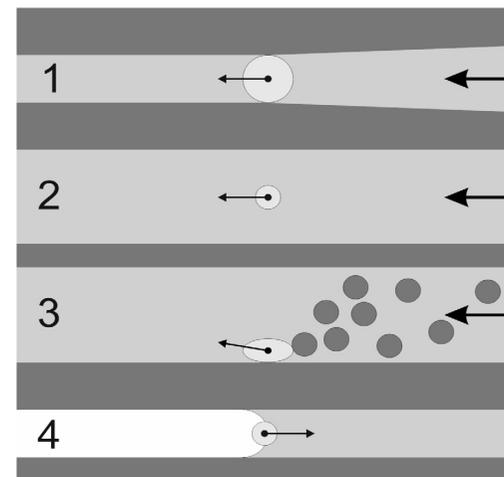


Рис. Иллюстрация механизмов срыва частиц. Цифры соответствуют номерам подзаголовков в тексте.

1. «Поршиновый эффект» Если сечение частицы близко сечению поры, то это

будет сильно препятствовать движению потока воды. Тогда на частицу будет действовать сила, обусловленная гидростатическим давлением или сила гидроудара, если частица при движении внезапно застрянет. Это довольно мощный механизм воздействия, но вероятность его срабатывания невелика из-за низкой вероятности соблюдения определённой конфигурации поры и частицы.

2. Вязкое трение Когда размеры частиц и пор различаются, то обтекающий поток тянет частицу силами вязкого трения. Самая простая модель, описывающая обтекание шара в широком проходе, рассчитывается по формуле Стокса: $F_s = 6\pi\eta u r$, где η – динамическая вязкость жидкости, u – скорость потока, r – радиус тела.

3. «Грязевой поток» Когда в потоке уже появились сорванные частицы, то при движении они могут «бомбардировать» закреплённые и вполне могут их выбить. Очевидно, это более эффективный механизм, чем просто вязкое трение чистой воды. Но невозможно спрогнозировать величину концентрации сорванных частиц, их состав по размерам и массе, чтобы посчитать эффективность этого механизма.

4. Капиллярный эффект Если осадок, соответствующий требованиям жёсткой матрицы, содержит кроме воды и воздух, то на границе этих фаз образуются плёнки поверхностного натяжения. Это создаёт капиллярные эффекты в жидкости за счёт образования в порах менисков на поверхности раздела. Обычно смачивание хорошее, что даёт вогнутый мениск и приводит к понижению давления в жидкости под мениском. А это в свою очередь создаёт силы, сжимающие поры и втягивающие пограничные хорошо смачивающиеся частицы. Если рассмотреть простейшую модель шарика, наполовину втянувшегося в середину мениска, то нетрудно посчитать возникающую силу втягивания, исходя из уравнения Лапласа: $F_L = 2\pi\sigma^2/R = 2\pi\sigma(r/R) \cdot r$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения, R – радиус кривизны сферического мениска, r – радиус тела.

Можно сравнить эффективность капиллярного механизма и механизма вязкого трения. Оказалось, что при нормальных условиях и соотношении $r/R = 1/2$, сила вязкого трения превысит капиллярную при скорости потока $u > 12$ м/с, которая кажется нереальной для внутривпоровых течений. Соответственно, при скорости потока 12 мм/с, с которой можно согласиться, разница в силах будет составлять три порядка в пользу капиллярных сил. Можно предположить, что для наземных осадков капиллярный механизм срыва частиц является основным.

Свойства PDRM, возникшей при участии капиллярного эффекта Кажется очевидным, что и при смачивании и при высушивании частицы могут срываться движущимися менисками одинаково. То есть эти процессы обладают одинаковой энергетикой и должны образовывать практически один и тот же ансамбль частиц, участвующих в постседиментационных процессах. Это последний штрих, завершающий объяснение причин квазиобратимости PDRM при смачивании. Из этого же следует возможность проявления квазиобратимости PDRM при высушивании. Это означает, что если при высушивании в поле образовалась PDRM, то при смачивании без поля она должна существенно распаться. То же относится к возможностям чистки нового типа – «влажной» чистки. Чистки методом высушивания или смачивания должны быть

эквивалентными.

Можно представить себе как выглядит кривая приращения PDRM при разном содержании влаги. Очевидно, в крайних точках – сухое и влагонасыщенное состояние – минимум. Объяснение в том, что вблизи этих точек минимальны общие площади менисков. А где-то посередине диапазона – максимум, когда общие площади менисков максимальны.

Здесь были рассмотрены только механизмы срыва. Но если сравнить условия, в которых магнитные частицы после срыва должны получать преимущественное направление по полю, то они существенно разные. При сушке в условиях дефицита влаги ориентация частицы должна быть затруднена. Опыт же говорит [3], что она всё-таки происходит. Можно ожидать, что величины PDRM при увлажнении и обезвоживании заметно отличаются.

Вывод Посредством использования простых моделей удалось объяснить не только результаты экспериментов, подтверждающих появление PDRM при смачивании и высушивании образцов, но и сформулировать и обосновать новые ожидаемые особенности образования этой PDRM.

1. *Зубов А.Г.* Особенности и роль в палеомагнитных исследованиях постседиментационной намагниченности, образующейся при изменении влагосодержания. Палеомагнетизм и магнетизм горных пород; теория, практика, эксперимент. Материалы семинара, Борок, 19-22 октября 2006 г. М.: ГЕОС, 2006. С. 62-68.
2. *Писаревский С.А.* Постседиментационная намагниченность континентальных отложений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 12. С. 76-81.
3. *Henshaw P.C., Merrill R.T.* Characteristics of drying remanent magnetization in sediments. // Earth and Planetary Science Letters. 1979. V. 43. P. 315-320.
4. *Кочегура В.В.* Применение палеомагнитных методов при геологической съёмке шельфа. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 1992. 144 с.