

**КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ Д.С. ТЯГУНОВА, А.Ф. ШЕСТАКОВА
«РЕГИСТРАЦИЯ МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ
НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РАЗРУШЕНИЮ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД»**

© 2026 А.Д. Коноплин, В.А. Щапов

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевца УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 620016;
e-mail: pbs002@mail.ru, vlad-shchapov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.07.2025; после доработки 12.03.2026; принята в печать 27.03.2026

В комментарии представлены результаты анализа экспериментальных данных и выводов, приведенных в обсуждаемой статье. В результате проведенного анализа выявлено несколько серьезных несоответствий и расхождений, указывающих на несовершенство примененной экспериментальной методики и измерительных средств. Выявлено несоответствие заявленных возможностей измерителя и количественных характеристик зарегистрированного сигнала, что ставит под сомнение достоверность первичных данных. На основе нескольких простых физических моделей проведено вычисление характеристик источника зарегистрированного магнитного эффекта, показывающее невозможность генерации магнитного поля с приведенными в статье величинами в описанных условиях эксперимента. Проведен анализ результатов публикаций по измерению электрических эффектов, сопровождающих нагрузку образца. Проведено сравнение с данными, опубликованными в других источниках, выявившее многократное (на несколько десятичных порядков) расхождение величины магнитного поля, приведенной в обсуждаемой статье, с данными аналогичных экспериментов. Показано, что связь зарегистрированного магнитного эффекта с разрушением образца крайне маловероятна. Предложены рекомендации и эксперименты по выявлению и выделению источников магнитного поля, наблюдаемого при разрушении образца на лабораторной установке.

Ключевые слова: разрушение образцов горных пород, электромагнитное излучение, магнитная индукция.

ВВЕДЕНИЕ

Обсуждаемая статья (Тягунов, Шестаков, 2024) посвящена новому для Института геофизики УрО РАН направлению исследований — изучению электромагнитных эффектов, сопровождающих разрушение горных пород, в связи с чем и привлекла внимание к представленным в ней результатам. Главной особенностью обсуждаемой статьи, которая обращает на себя внимание и вызывает интерес, является результат эксперимента, что повлекло за собой проведение анализа эксперимента и выполнение расчетных проверок экспериментальных данных. В результате анализа был обнаружен ряд критических несоответствий и противоречий экспериментальных результатов с условиями проведения эксперимента, что в конечном итоге, если не

лишило обсуждаемое исследование всякого смысла и значения, то поставило под серьезные сомнения достоверность его результатов.

Для обсуждения статьи следует дать общую характеристику этой работе. В обсуждаемой публикации приводятся результаты и описание проведения эксперимента по обнаружению и количественной оценке электромагнитных эффектов в частотном диапазоне 0.01–200 Гц, сопровождающих разрушение горных пород. Как следует из текста обсуждаемой статьи, обнаружение этих эффектов позволило бы более надежно обнаруживать и предсказывать подземные катастрофические события, так как электромагнитные колебания в низкочастотном диапазоне слабее поглощаются земной толщей и поэтому более надежно регистрируются на дневной поверхности.

Для проверки гипотезы о генерации низкочастотных электромагнитных колебаний был поставлен и проведен лабораторный эксперимент по разрушению образца базальта кубической формы размером 24×24×24 мм гидравлическим прессом с одновременной регистрацией магнитного поля экспериментальным трехкомпонентным магнитометром, установленным на расстоянии 0.45 м от объекта воздействия. Приводятся магнитограммы фонового магнитного поля и магнитного поля в момент разрушения образца и их частотные спектры, в результате чего делается вывод об успешном обнаружении искомого эффекта.

К положительным сторонам обсуждаемой статьи следует отнести обширный, исчерпывающий обзор публикаций по теме исследований, позволяющий легко сориентироваться в теме и получить представление о современном состоянии исследований, простую, ясную и прозрачную постановку эксперимента, приведение результатов в максимально близком к первичным измерениям (необработанном) виде, что значительно облегчает понимание и анализ этих данных. К недостаткам статьи нужно отнести непропорционально большой обзор, несоразмерный с масштабом эксперимента. Это выглядит так, как будто авторы пытались компенсировать скромный по объему эксперимент объемом цитирования. Другой серьезный недостаток — приведены результаты всего одного эксперимента, из-за чего нельзя сделать каких-либо обобщающих и систематизирующих выводов, а про сам эксперимент сказать — являются ли его результаты типичными или аномальными.

Но основные проблемы обсуждаемой публикации заключаются в отсутствии анализа полученных результатов и проверки их корректности, из-за чего, по нашему мнению, за искомым эффектом принят сигнал скорее всего не имеющий непосредственного отношения к разрушению, а являющийся побочным паразитным эффектом. На наличие проблем указывают несколько серьезных нестыковок, расхождений и противоречий, обнаруженных в публикации.

В данном комментарии будет выполнен анализ полученных экспериментальных данных и обсуждены наиболее значимые проблемы. Кроме того, в комментарии будет проведен некоторый анализ процитированных в обсуждаемой работе и публикаций по аналогичным исследованиям с целью выяснения корректности проведенного эксперимента.

Основные нестыковки в обсуждаемой статье состоят в следующем:

1. Несоответствие коэффициента преобразования датчика магнитного поля зарегистрированным значениям магнитной индукции.

Приведенная в статье величина коэффициента преобразования слишком велика для регистрации полей такой величины (или наоборот: магнитное поле с величинами, приведенными в статье, не может быть зарегистрировано датчиком с такой чувствительностью). Это дает основания предположить, что приведенные в статье величины эффектов сильно отличаются по величине от фактических.

2. Слишком большая величина зарегистрированного магнитного поля. Приведенные в статье значения магнитной индукции не могут быть объяснены процессами разрушения образца, что позволяет предположить их стороннее происхождение, в частности от движения или деформации металлических ферромагнитных частей пресса.

3. Значительное расхождение с данными по аналогичным экспериментам в других публикациях (Hadjicotis, Mavromatou, 1994; Li et al., 2018).

4. В аналогичных публикациях по теме эксперимента (Li et al., 2018) инструментально зафиксирован вибрационно-сейсмический эффект, сопровождающий разрушение образца, что может полностью опровергать первоначальные предположения о магнитных явлениях, вызванных непосредственно разрушением образца, как в обсуждаемой, так и в аналогичной публикации.

Рассмотрим каждую нестыковку подробно.

Расхождения в характеристиках чувствительности датчика магнитного поля. Первое, что обращает на себя внимание в статье — это нестыковка заявленного коэффициента преобразования датчика с наблюдаемыми величинами магнитных эффектов. В критикуемой статье указан коэффициент преобразования 178.5 мВ/нТл, зарегистрированные изменения магнитной индукции лежат в пределах тысяч нТл, достигая в максимуме 11000 нТл. Легко подсчитать, что при заявленной чувствительности датчика такое изменение магнитной индукции будет соответствовать приращению напряжения на выходе датчика на $0.1785 \text{ [В/нТл]} \cdot 11000 \text{ [нТл]} = 1.96 \text{ кВ}$.

Величина совершенно абсурдная и фантастическая. Никакая современная (и устаревшая тоже) измерительная и усилительная техника не оперирует такими огромными напряжениями. Следовательно, в каком-то (или в обоих) из приведенных в статье значений содержится ошибка. Как следует из ссылок на описание примененного датчика магнитного поля (Сокол-Кутыловский, 2010; Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007; Sokol-Kutylovskii, 2016), использованный в работе прибор представляет собой экспериментальный лабораторный макет, за время своего существования подвергшийся многочисленным модификациям и изменениям

конструкции. В наиболее раннем литературном источнике (Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007) явно приведен диапазон изменений выходного напряжения: ± 12 В, что соответствует возможностям современной элементной базы. При этом коэффициент преобразования мог быть установлен в пределах 0.05–0.2 мВ/нТл, в зависимости от величины напряжения питания ($\pm 5 \div \pm 15$ В) (Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007). Для отсечки постоянной составляющей земного магнитного поля предлагается использовать фильтр верхних частот с частотой среза 0.05 Гц. В следующем источнике (Сокол-Кутыловский, 2010) коэффициент преобразования увеличен до 71 мВ/нТл в полосе частот 0.01–35 Гц. В этой публикации указаны использованные в приборе электронные компоненты (ОР177...), что неявно подтверждает ранее указанный диапазон выходного напряжения и диапазон напряжений питания. В наиболее позднем источнике (Sokol-Kutylovskii, 2016), приведена величина коэффициента преобразования в диапазоне 0.01–10 мВ/нТл и указана использованная элементная база (ОР37...; ОР177...), уже упомянутая в более ранних литературных источниках (Сокол-Кутыловский, 2010). Указано, что для нормальной работы датчика при любой ориентации в земном магнитном поле коэффициент преобразования устанавливается в диапазоне 0.1–0.16 мВ/нТл при напряжении питания ± 15 В. Если постоянная составляющая поля отсекается фильтром верхних частот, то выходной сигнал может быть еще дополнительно усилен в 300–500 раз. То есть, согласно данным этого источника коэффициент преобразования может быть установлен в очень широком диапазоне значений от 0.01 до 30–80 мВ/нТл. В обсуждаемой статье эта величина составляет 178.5 мВ/нТл. Таким образом, анализ публикаций по теме использованного в эксперименте датчика не дает однозначный ответ, каково значение коэффициента преобразования и диапазон измерений магнитной индукции у этого прибора. Из публикаций (Сокол-Кутыловский, 2010; Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007; Sokol-Kutylovskii, 2016), следует, что датчик может иметь и большой коэффициент преобразования (178.5 мВ/нТл не противоречит источникам) и может измерять в диапазоне земного магнитного поля (± 100000 нТл). Однако эти возможности взаимоисключающие, т. е. в зависимости от настроек может быть либо высокая чувствительность, либо широкий динамический диапазон. Это вызывает сомнения в приведенных в обсуждаемой статье величинах магнитного поля. Можно было бы предположить, что в статье ошибочно указано значение коэффициента преобразования в мВ/нТл вместо мкВ/нТл, тогда выходное напряжение преобразователя оказывалось бы в пределах 2 В,

что обеспечивается конструкцией преобразователя. Однако, если допустить это предположение, возникает следующая проблема: величина зарегистрированного магнитного поля слишком велика, чтобы быть созданной разрушаемым образцом.

Противоречия с величиной зарегистрированного магнитного поля. В ходе обсуждаемого эксперимента были зарегистрированы импульсы магнитной индукции с амплитудами от 500 до 11000 нТл в максимуме. Для геофизических методов это большие величины, практически сравнимые с горизонтальной составляющей магнитной индукции земного магнитного поля на широте места проведения эксперимента (Магниторазведка..., 1990). Насколько реально получить в ходе лабораторного эксперимента такие значения? Рассмотрим возможные характеристики источника, связанного с образцом и способного создать магнитное поле такой величины.

Магнитное поле может создаваться источниками двух типов — электрическим током и веществом, обладающим намагниченностью (индуцированной и/или остаточной). Базовым законом, связывающим силу электрического тока и создаваемое им магнитное поле, является закон Био–Савара–Лапласа (Магниторазведка..., 1990), определяемый в системе физических единиц СИ как:

$$dB = \frac{\mu_0 Idl \times r}{4\pi|r|^3},$$

где dB — приращение магнитной индукции, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), I — сила тока, dl — элементарный отрезок с током, r — радиус-вектор, соединяющий точку, для которой определяется поле с элементарным отрезком dl . Если предположить, что магнитное поле создается линейным током разделения зарядов в разрушаемом образце, то величину этого поля (при условии расстояния, намного большего размера образца) можно выразить как:

$$B = \frac{\mu_0 Id}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где d — размер образца, r — расстояние между образцом и магнитометром, откуда можно найти силу тока, создающего такое поле:

$$I = \frac{4\pi r^2 B}{\mu_0 d}.$$

Подставив значения $B = 1.1 \cdot 10^{-5}$ Тл, $r = 0.45$ м, $d = 0.024$ м (длина грани образца кубической формы), найдем силу тока в максимуме $I = 930$ А. Величина не вызывающая никаких сомнений в своей нереалистичности, т.е. абсолютно недосягаемая. Если допустить, что электрическое сопротивление образца не падает в момент

разрушения скачкообразно до очень низких значений, то протекание такого тока в приведенном временном интервале в образце базальта с его типичным удельным электрическим сопротивлением (Физические..., 1984) вызвало бы выделение нескольких гигаджоулей тепловой энергии, что привело бы не к разрушению образца, а к серьезному повреждению помещения, в котором проводился эксперимент. Однако, это не единственная проблема в данной модели. Если появляется линейный ток разделения зарядов, то должно наблюдаться поле не только разделения, но и поле тока последующего объединения разделенных зарядов, имеющее противоположный знак, т. е. импульс поля должен быть симметричным относительно нулевого уровня, чего в эксперименте не наблюдается.

Если предположить, что магнитное поле создается круговым током в образце (что само по себе трудно представить, при каких бы условиях возможно), то величину магнитной индукции на оси магнитного диполя можно выразить как (Магниторазведка..., 1990; Электроразведка..., 1989):

$$B = \frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} = \frac{\mu_0 IS}{2\pi r^3}, \quad (2)$$

где

$$M = \frac{2\pi r^3 B}{\mu_0} \quad (3)$$

— магнитный момент магнитного диполя, $S = d^2$ — площадь контура источника, откуда можно вычислить силу тока в контуре:

$$I = \frac{2\pi r^3 B}{\mu_0 d^2}$$

Подставив полученные в эксперименте значения магнитной индукции и расстояния найдем магнитный момент источника $5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ и силу тока в максимуме 8.7 кА . И опять фантастически огромное значение, многократно большее, чем в предыдущей модели, заведомо недостижимое в таком эксперименте. Если предположить, что ток, создающий магнитное поле протекает не только по телу образца, а по бесконечно длинному прямому проводнику (для которого скорость уменьшения напряженности магнитного поля с расстоянием минимальна), то в этом случае величина магнитной индукции будет выражена как:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (4)$$

и, соответственно, ток:

$$I = \frac{2\pi r B}{\mu_0}$$

в такой модели составит 25 А . И даже при таких, заведомо невыполнимых условиях, необходимая сила тока оказывается нереально большой. Таким образом, происхождение магнитного поля в обсуждаемом эксперименте невозможно объяснить каким-либо протеканием электрического тока — для его создания требуются перемещение слишком большого количества электрического заряда.

Может ли магнитное поле создаваться намагниченностью вещества образца в момент разрушения? Использованный в эксперименте базальт может содержать в себе вкрапленность магнетита и других магнитных минералов, из-за чего может обладать намагниченностью (и остаточной и индуцированной) (Физические..., 1984). Если предположить, что магнитное поле создается веществом образца, то общую намагниченность (сумму остаточной и индуцированной намагниченности) вещества можно вычислить как магнитный момент, отнесенный к объему вещества (Магниторазведка..., 1990):

$$J = \frac{M}{V} = \frac{M}{d^3},$$

где J — общая намагниченность, $V = d^3$ — объем образца, при наиболее благоприятном условии расположения оси магнитометра на оси магнитного диполя. Вычислив магнитный момент по формуле (3), найдем намагниченность: 360 кА/м . И снова это нереально большая величина. Намагниченность базальта действительно велика, но только по сравнению с другими горными породами, например по сравнению с известняком. Но даже наиболее сильно намагниченные образцы базальта имеют намагниченность в первые единицы А/м (Физические..., 1984). В литературе по электромагнитным явлениям, сопровождающим разрушение, есть данные о спонтанном намагничивании вещества, однако эти явления наблюдались в ферромагнитных материалах на фронте ударной волны с давлением 10 ГПа , при длительностях единицы $\mu\text{с}$ (Сурков, 2000). Ни первое, ни второе, ни третье условие в обсуждаемом эксперименте не выполняются. А примеров скачкообразного увеличения намагниченности в сотни тысяч раз под действием нагрузки для базальта (да и для других горных пород) неизвестно.

В приведенных оценках использованы и рассмотрены наиболее простые модели источников и наиболее благоприятные сочетания ориентировки источник/измеритель. Если рассмотреть более сложные модели (магнитный мультипольный источник, неравномерное распределение зарядов) то в результате будут получены еще большие и, соответственно, еще менее реалистичные значения токов и намагниченностей,

так как поле мультипольного источника уменьшается с расстоянием быстрее, чем поле дипольного. Таким образом, ни перемещением электрического заряда, ни намагничиванием вещества объяснить результаты проведенного эксперимента невозможно.

Сравнение с результатами аналогичных экспериментов, проведенных другими исследователями. При постановке эксперимента в качестве одной из отправных точек авторы обсуждаемой статьи (Тягунов, Шестаков, 2024) взяли исследование (Nadjicontis, Mavromatou, 1994), в котором зарегистрированы низкочастотные электрические сигналы на торцах образца при одноосном сжатии. Исходя из предположения о связи магнитного и электрического поля системой уравнений Максвелла авторы обсуждаемой статьи (Тягунов, Шестаков, 2024), сделали логичное предположение, что эффект должен проявляться и в магнитном поле. Не сделано, однако, было основное: не была выполнена количественная оценка ожидаемого эффекта. В эксперименте цитируемой работы (Nadjicontis, Mavromatou, 1994), исследовалась реакция на одноосное сжатие образцов кубической формы кварца, гранита, известняка с гранью 30 мм. При этом фиксировалась разность потенциалов, возникающая на гранях образца во время приложения усилия. Для измерения разности потенциалов был использован специализированный высокоомный вольтметр с входным сопротивлением 10 ГОм (10^{13} Ом), что косвенно указывает на высокие контактные сопротивления и, соответственно, малые значения токов. В момент приложения усилия к образцу фиксировалась разность потенциалов до 60 мВ на известняке и до 250 мВ на граните и кварце. При указанных размерах образца и его удельном электрическом сопротивлении в высушенном виде (гранит: 10^6 – $8 \cdot 10^7$ Ом·м, кварц: 10^{12} – 10^{14} Ом·м, известняк: 10^4 – 10^6 Ом·м) (Справочник..., 1975; Физические..., 1984) получим ток при такой разности потенциалов 7.5 нА для гранита, 0.18 мкА для известняка, 0.25 пА для кварца в максимуме (при удельном сопротивлении, взятом по наименьшей границе).

Создаваемое линейным отрезком с таким током магнитное поле, вычисленное по формуле (1) составит всего 2.67 фТл на расстоянии 0.45 м, при размерах образца 30 мм. Это более чем на 9 десятичных порядков меньше зарегистрированного в обсуждаемой статье и на пределе возможностей обнаружения самыми современными магнитометрами при условии полного экранирования внешнего поля (Фалей и др., 2012). Для кольцевого тока такой величины магнитная индукция, вычисленная по формуле 2, составит 0.36 фТл, что более чем на 10 десятичных

порядков меньше зарегистрированного в обсуждаемом эксперименте. И даже если принять наиболее благоприятную конфигурацию тока в виде бесконечного линейного проводника, то величина магнитной индукции, вычисленная по формуле 4, в этом случае составит 32 фТл, что тоже намного ниже зарегистрированной в эксперименте.

Хотя по теме исследования электромагнитных эффектов, сопровождающих разрушение или нагрузку материала, проведено большое количество экспериментов, большая часть из них связана с изменениями в области высоких частот. И, тем не менее, исследования по измерению электромагнитной активности в низкочастотной области есть, и было бы интересно сравнить данные из обсуждаемой публикации с аналогичными исследованиями.

В работе (Li et al., 2018) приводятся результаты измерения эффектов низкочастотного магнитного поля сопровождающих разрушение образца угля. В этом эксперименте изучался отклик образца каменного угля на одноосное разрушающее сжатие. Для регистрации магнитных сигналов был использован серийно выпускаемый феррозондовый магнитометр (Mag649) производства Bartington Instruments company. Расстояние между разрушаемым образцом и магнитометром составило 0.05 м. Были использованы образцы цилиндрической формы длиной 100 мм и диаметром 50 мм (Li et al., 2018). В ходе экспериментов в момент разрушения образца были зафиксированы колебания магнитного поля осциллирующего вида с максимальными амплитудами от 13 до 156 нТл и периодом пульсаций несколько сотен мс.

Для сравнения с обсуждаемым экспериментом рассмотрим возможные характеристики источника: силу тока на отрезке проводника, силу тока по стенке цилиндра, силу тока в бесконечно длинном прямом проводнике и намагниченность образца. С учетом размеров образца примем расстояние между точкой измерения и центром магнитного диполя равным 0.075 м. Тогда, магнитное поле, создаваемое конечным проводником можно рассчитать как (в этом случае уже необходимо учитывать размеры и форму источника):

$$B = \frac{\mu_0 I (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2))}{4\pi r},$$

где $\cos(\alpha)$:

$$\cos(\alpha_1) = -\cos(\alpha_2) = \frac{H}{\sqrt{H^2 + (2r + d)^2}}$$

— косинус угла между направлением на конец проводника и осью проводника, H — высота цилиндра (100 мм), r — расстояние от датчика до образца, d — диаметр цилиндра.

Откуда можно получить формулу для вычисления силы тока в отрезке проводника по оси цилиндра:

$$I = \frac{4\pi B (r + d/2)}{\mu_0 2 \cos(\alpha_1)}.$$

Подставив в полученное выражение известные значения приращения магнитной индукции (будем считать по максимуму — 156 нТл), размеров и расстояния получим значение силы тока 105 мА. Для вычисления силы кольцевого тока ввиду отсутствия прямого аналитического выражения придется прибегнуть к расчетам численными методами, которые дадут величину в 560 мА тока с постоянной плотностью вдоль стенки цилиндра. Вычисление тока бесконечно длинного проводника по формуле (4) даст оценку в 58.5 мА. Оценку намагниченности с учетом размеров и формы тела тоже придется выполнить численными методами, что даст в результате 5.59 А/м (при условии однородной намагниченности вдоль оси образца). По сравнению с обсуждаемым исследованием, в аналогичной работе (Li et al., 2018) максимальный эффект оказался 70 раз (почти на два десятичных порядка) меньше, при расстоянии между источником поля и измерителем меньшим в 9 раз. По величине тока в бесконечном линейном проводнике обсуждаемый эксперимент превосходит аналогичный в 423 раза (на два с половиной десятичных порядка), по величине тока в отрезке проводника — в 8800 раз (почти на четыре десятичных порядка), по величине кольцевого тока — в 15600 раз (более чем на четыре десятичных порядка), по величине однородной намагниченности — в 64900 раз (почти на пять десятичных порядков), по магнитному моменту — в 4600 раз (на три с половиной десятичных порядка). Такие большие расхождения (даже не в разы, а на порядки) между характеристиками источника поля, полученные по данным разных экспериментов невозможно объяснить только различиями физических свойств испытуемых материалов, что свидетельствуют о несовершенстве методики подобного рода измерений и об ошибках в каком-то (а, возможно, в обоих) экспериментах.

Полученные по данным эксперимента из процитированной статьи (Li et al., 2018) значения характеристик токов и намагниченностей источника уже не выглядят невероятно огромными, но тем не менее, величины токов в десятки и сотни мА и намагниченности в единицы А/м (да еще и осциллирующего характера), предположительно возникающие в момент разрушения образца немагнитной горной породы, представляются крайне маловероятными. Если такие токи разделения зарядов возникают в небольшом образце,

то при разрушении крупных блоков во время обработки месторождения или при аварийном разрушении должны возникать такие токи огромных величин (сотни и тысячи ампер), чего в реальной практике никогда не наблюдалось.

Однако, ответ на вопрос о реальном происхождении низкочастотных магнитных сигналов при разрушении образца, можно найти в этом же исследовании.

Наличие и влияние вибрационно-сейсмического эффекта по данным аналогичных экспериментов. В публикации (Li et al., 2018) приведена еще одна очень важная и интересная для подобного рода исследований характеристика: это регистрация вибрационно-сейсмической активности, сопровождающей разрушение образца. В цитируемой статье (Li et al., 2018) приведена акселерограмма, снятая во время эксперимента по разрушению образца и указана модель примененного акселерометра. В исследовании отмечается, что начало сейсмического воздействия регистрируется позже начала магнитного эффекта, а окончание сейсмического воздействия — раньше окончания магнитного эффекта, из чего авторы цитируемой статьи делают вывод, что магнитный эффект является не связанным с вибрацией, возникающей в момент разрушения (хотя интервалы времен сейсмического воздействия и магнитного эффекта перекрываются). Если более подробно изучить приведенные графики, то на них можно увидеть, что акселерограмма (преднамеренно или нет) приведена в единицах напряжения на выходе акселерометра (в вольтах). В цитируемой публикации (Li et al., 2018) указана использованная для измерения ускорения модель серийно производимого прибора (Colibrus SF1500MEMS), на которую есть документация в открытом доступе (SF1500 – SF2600...). Зная характеристики прибора, приведенные в этом документе можно оценить величину ускорения. Из документации на акселерометр следует, что примененный прибор имеет коэффициент преобразования 1.2 В/г (где g — ускорение свободного падения) с полным диапазоном $\pm 3g$ ($\pm 3.6 В$). Полный диапазон изменения ускорения по акселерограмме составил около 7 В, что в пересчете на единицы ускорения составляет около 6g ($\sim 60 м/с^2$) на интервале 0.5 с. Точнее тут следует сказать, что полный диапазон изменений ускорения составил не менее 60 м/с² поскольку, скорее всего, имел место выход за рабочий диапазон. Из приведенной в работе (Li et al., 2018) акселерограммы трудно оценить время действия ускоряющей силы при максимальном ускорении (надежно определяется только максимальное значение), однако, даже при малых (первые десятки мс) временных интервалах движения с таким ускорением, которое незаметно визуально, датчик

магнитного поля может сместиться на расстояние или развернуться на угол, достаточный для регистрации изменения поля в несколько десятков нТл. Этот механизм может быть основным в генерации сигнала на выходе датчика — сигнал появляется не в результате изменения внешнего магнитного поля, а за счет поворота или перемещения датчика. Косвенно на эту причину указывает осциллирующий характер колебаний, более свойственный механической вибрации после ударного воздействия, нежели кратковременному процессу разрушения.

Неизвестно, упустили ли авторы цитируемого исследования (Li et al., 2018) этот момент из внимания случайно или преднамеренно оставили возможность сделать правильный вывод более внимательному читателю, однако приведенные акселерограммы указывают на недопустимо сильное вибрационно-сейсмическое воздействие в ходе эксперимента.

При этом сами авторы этого эксперимента (Li et al., 2018) предполагали возможность такого механизма генерации магнитных колебаний, поэтому предприняли ряд мер: регистрация ускорений во время всего цикла нагрузки, использование специально сконструированного из немагнитного материала нагружающего устройства, запрет на движение и любые действия персонала во время эксперимента. Это дало определенный эффект, что выразилось в том, что зафиксированный магнитный сигнал оказался значительно меньше, чем в обсуждаемом эксперименте, но, возможно, оказалось недостаточным. В обсуждаемой работе (Тягунов, Шестаков, 2024) подобного измерения вибрационно-сейсмических эффектов сделано не было, но нет никаких сомнений, что такой эффект в этом эксперименте тоже был и, возможно, он и стал причиной зафиксированного сигнала.

Возможные механизмы генерации магнитного сигнала. Инструмент воздействия (пресс), находящийся в непосредственном взаимодействии с образцом в обсуждаемом эксперименте имеет массу в десятки тысяч раз большую, чем масса испытуемого объекта. При этом сам пресс почти полностью состоит из ферромагнитного материала, имеющего кроме индуцированной еще и остаточную намагниченность. Это делает инструмент воздействия в сотни тысяч, а возможно и в миллионы раз более сильным источником магнитного поля, чем сам объект воздействия (образец). В таких условиях достаточно совсем незначительного перемещения прессы или деталей его конструкции, чтобы получить огромное изменение магнитного поля, поэтому в данном эксперименте первоочередной задачей должна была быть изоляция влияния прессы и детальный контроль движения на всем

протяжении эксперимента. Авторы выполнили приблизительное измерение расстояния между нагрузочными плитами до и после разрушения образца, но этого явно недостаточно, чтобы утверждать, что пресс не оказал влияния на результаты эксперимента.

Приведенные оценки и расчеты показывают, что измеренный в обсуждаемой статье эффект изменения магнитной индукции, скорее всего, не имеет непосредственного отношения к процессам, происходящим в образце горной породы при ее разрушении. Опосредованная связь в виде релаксации деформации металлических конструкций прессы в момент разрушения или (что еще более вероятно) вибрационно-сейсмическое воздействие на датчик и сам пресс могут быть наиболее реалистичным объяснением. Косвенно на такую причину указывает временная зависимость магнитного поля, нехарактерная для быстропротекающего процесса разрушения — длительные (сотни миллисекунд — первые секунды) аperiodичные импульсы. С учетом большой неопределенности коэффициента преобразования магнитометра, выявленной в обсуждаемой статье, можно предположить, что имеют место две основных проблемы: неточное измерение магнитного поля (величина в 11000 нТл вызывает большие сомнения) и ошибка атрибуции наблюдаемого эффекта (сам по себе образец при разрушении не может создать поля такой величины).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было бы неконструктивно указывать на проблемы, не предлагая способов, мер и путей преодоления этих проблем. И в качестве решений, позволяющих определить природу зарегистрированных колебаний можно предложить провести следующие экспериментальные исследования:

1. Обязательно: провести калибровку магнитного датчика на стенде и выполнить контрольные измерения магнитного поля известной величины. Периодическая проверка и калибровка это обязательная процедура для всех без исключения измерительных приборов и экспериментальных и серийно выпускаемых. Контрольные измерения выполнить тем же аппаратно-программным комплексом и с такими же настройками, что и сам эксперимент. Это единственная работа, которую необходимо проделать обязательно. Другие нижеперечисленные эксперименты можно порекомендовать сделать:

2. Провести измерения с синхронной регистрацией сейсмического или акустического воздействия, причем желательно регистрировать ускорение не только на конструкции, связанной

с разрушаемым образцом, но и на самом датчике. В полном формате это должна быть регистрация трех поступательных и трех вращательных компонент движения и на образце и на датчике магнитного поля.

3. Оценить степень влияния колебаний металлической конструкции пресса на датчик, т.е. измерить, какое приращение магнитного поля возникает при перемещении пресса целиком или какой-либо из его подвижных частей.

4. Провести эксперимент с синхронной регистрацией магнитного поля прибором, не подверженным влиянию механического перемещения или поворота в магнитном поле, например протонным магнитометром. Наблюдаемые в эксперименте длительности и амплитуды могут быть зафиксированы таким типом датчика. Кроме того, такой эксперимент позволит уменьшить неопределенность оценки амплитуды эффекта.

5. Получить и проанализировать зависимость наблюдаемого эффекта магнитного поля от формы и размеров разрушаемого образца и от приложенного усилия разрушения. Это позволит либо подтвердить, либо опровергнуть некоторые предположения о механизме возникновения магнитного поля при разрушении.

6. Провести измерение магнитных эффектов, применяя другой способ разрушения образца, без использования пресса и вообще каких-либо металлических конструкций, например путем разрыва замерзающей водой или воздействия немагнитной непроводящей ударной частью.

Приведенный список, конечно же, не полон и может быть существенно расширен более сложными экспериментами, однако если провести хотя бы некоторые из предложенных, то можно было бы внести ясность в понимание природы зарегистрированного эффекта и идентифицировать источник сигнала.

Список литературы [References]

- Магниторазведка. Справочник геофизика. // Под ред. В.Е. Никитского и Ю.С. Глебовского. М.: Недра, 1990. 470 с. [Magnetic prospecting. Geophysicist's handbook. // Edited by V.E. Nikitsky, Yu.S. Glebovsky. Moscow: Nedra, 1990. 470 p. (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С. Аппаратура для регистрации магнитного поля низких частот // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4(13). С. 69–73 [Sokol-Kutylovsky O.L., Tyagunov D.S. Equipment for registration of the magnetic field of low frequencies // Ural Geophysical Bulletin. 2007. № 4(13). P. 69–73 (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л. О пороге чувствительности магнитомодуляционных датчиков // Уральский геофизический вестник. 2010. № 2(17). С. 62–65 [Sokol-Kutylovsky O.L. On the threshold of sensitivity of magnetomodulation sensors // Ural Geophysical Bulletin. 2010. № 2(17). P. 62–65 (in Russian)].

Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. // Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодиаконова. М.: Недра, 1975. 279 с. [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks. // Edited by N.V. Melnikov, V.V. Rzhnevsky, M.M. Protodiakonov. Moscow: Nedra, 1975. 279 p. (in Russian)].

Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. 447 с. [Surkov V.V. Electromagnetic effects in earthquakes and explosions. Moscow: МЕРФИ, 2000. 447 p. (in Russian)].

Тягунов Д.С., Шестаков А.Ф. Регистрация магнитомодуляционным датчиком низкочастотного электромагнитного излучения в лабораторных экспериментах по разрушению образцов горных пород // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2024. № 3 (63). С. 18–28. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-3-63-18-28> [Registration of low-frequency electromagnetic emission by a magnetomodulation sensor in laboratory experiments on destruction of rock samples (in Russian)].

Фалей М.И., Масленников Ю.В., Кошелец В.П. Измерительные системы на ВТСП СКВИДАх // Радиотехника. 2012. № 12. С. 5–26 [Faley M.I., Maslennikov Yu.V., Koshelets V.P. Measuring systems on high-temperature superconductor of SQUIDs // Radiotekhnika. 2012. № 12. P. 5–26].

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика // Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с. [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Geophysicist's handbook // Edited by N.B. Dortman. Moscow: Publishing House «Nedra», 1984. 455 p. (in Russian)].

Электроразведка. Справочник геофизика. Книга первая. // Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989. 438 с. [Electrical prospecting. Geophysicist's handbook. // Edited by V.K. Khmelevskoi, V.M. Bondarenko. Moscow: Nedra, 1989. Vol. 1. 438 p. (in Russian)].

Hadjicontis V., Mavromatou C. Transient electric signals prior to rock failure under uniaxial compression // Geophysical Research Letters. 1994. V. 21. № 16. P. 1687–1690.

Li C., Fu S., Guan C. et al. Characteristics and generation mechanism of ULF magnetic signals during coal deformation under uniaxial compression. Journal of Geophysics and Engineering. 2018. V. 15. Iss. 4. P. 1137–1145. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaac59>

OP37 Low Noise, Precision, High Speed Operational Amplifier. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/op37.pdf> (дата обращения 2025-06-30).

OP177 Ultraprecision Operational Amplifier. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/op177.pdf>

SF1500 – SF2600 Class B seismic sensor for strong motion earthquake monitoring or structural health monitoring. https://sensorsandpower.angst-pfister.com/fileadmin/products/datasheets/190/SF1500-SF2600_1640-21481-0003-E-0811.pdf

Sokol-Kutylovskii O.L. Magnetomodulation sensors based on amorphous ferromagnetic alloys // Measurement Techniques. 2016. V. 59. № 2. P. 170–175. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0937-x>

КОНОПЛИН, ЩАПОВ

**COMMENTS ON THE ARTICLE BY D.S. TYAGUNOV AND A.F. SHESTAKOV
«REGISTRATION OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC EMISSION
BY A MAGNETOMODULATION SENSOR IN LABORATORY EXPERIMENTS
ON THE DESTRUCTION OF ROCK SAMPLES»**

A.D. Konoplin, V.A. Shchapov

*Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 620016;
e-mail: pbs002@mail.ru, vlad-shchapov@yandex.ru*

Received Yule 29, 2025; revised March 12, 2026; accepted March 27, 2026

The commentary presents the results of the analysis of experimental data given in the article under discussion. The analysis revealed several serious inconsistencies and discrepancies, indicating the imperfection of the applied experimental methodology and measuring instruments. A discrepancy has been found between the stated capabilities of the measuring device and the quantitative characteristics of the recorded signal, which casts doubt on the reliability of the primary data. Based on several simple physical models, the characteristics of the source of the recorded magnetic effect were calculated, showing that it is impossible to generate a magnetic field with the values given in the article under the described experimental conditions. An analysis of the results of publications on the measurement of electrical effects accompanying the loading of the sample was carried out. A comparison with data published in other sources was carried out, revealing a multiple (by several orders of magnitude) discrepancy between the magnetic field value given in the article under discussion and the data from similar experiments. It is shown that the connection between the recorded magnetic effect and the destruction of the sample is extremely unlikely. Recommendations and experiments on detection and identification of sources of the magnetic field observed during the sample destruction in a laboratory setup are proposed.

Keywords: destruction of rock samples, electromagnetic radiation, magnetic induction.