

6. Перспективы геофизики и геомеханики при прогнозе зон тектонических деструкций угленосного массива / М.М. Довбнич, Я.В. Мендрий, А.И. Компанец, И.А. Виктосенко // Уголь Украины. – 2012. – №1. – С. 44-48.
7. Мендрий Я.В. Развитие технологии расчета когерентности на основе усовершенствованных моделей сейсмической записи / Я.В. Мендрий, Ю.К. Тяпкин // Геофизический журнал. – 2012. – № 3. – С. 102-115.
8. Chopra S. Volumetric curvature attributes for fault/fracture characterization / S. Chopra, K. Marfurt // First Break. – 2007. – v. 25, № 7. – P. 35-46.
9. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов: монография / А.Д. Алексеев; Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Киев: Наук. думка, 2010. – 423 с.
10. Васильковский В.А. Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля / В.А. Васильковский, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, – 2006. – №9. – С. 62-70.
- 11 Алексеев А.Д. Кинетика и механизмы десорбции метана из угля / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства: сб. научн. тр. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2005. – Вып. 8. – С. 9-21.
12. Радиофизика в угольной промышленности / А.Д. Алексеев, В.У. Зайденварг, В.В. Синолицкий, Е.В. Ульянова. – М.: Недра, 1992. – 184 с.
13. Васильковский В.А. Трансформация механизма десорбции метана из угля. Три фазы десорбции / В.А. Васильковский // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. трудов. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2009. – №12. – С. 4-10.
14. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. / Л.С. Лейбензон. – М.-Л.: ОГИЗ. – 1947. – 244 с.
15. Васильковский В.А. Метод определения фильтрационной и диффузионной составляющих характерного времени десорбции метана из каменного угля / В.А. Васильковский // Вести Донецкого горного института. – 2008. – № 1. – С. 101–108.

О ПРИЧИНАХ И МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Б.С. Ищенко, В.В. Соболев, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепрпетровск, Украина

Проявления катастрофических событий независимо от масштабов (землетрясения, внезапные выбросы породы, горные удары) являются заключительным этапом в сценарии деструктивных процессов, формирующих состояние неустойчивости некоторой части (очага) массива пород. Насыщение породного массива избыточным запасом энергии главным образом заключается в увеличении концентрации зарядов в дефектах микроструктуры и межзерновых границах минералов, на межфазных границах и на межслойных поверхностях пород. Насыщение зарядами достигается как последовательными, так и одновременными воздействиями различных механических и физических факторов, «быстрой» заменой вещественного состава фазы, заполняющей поровое пространство, и др. Предполагается, что основные физико-химические процессы формирования в массиве пород очага, характеризующегося состоянием неустойчивости, обусловлены электромагнитными эффектами.

За последние десятилетия отмечается значительный рост частоты и силы землетрясений, которые произошли в различных странах мира, при этом за последнее столетие 2010 год стал рекордным, о чем свидетельствуют данные, приведенные на рис. 1. Особенно рост землетрясений, вызванных, производственной деятельностью, заставляет обратить на них самое пристальное внимание. Техногенные землетрясения могут быть вызваны подземными ядерными взрывами, искусственным обрушением горных пород, при строительстве водохранилищ, при выемке больших масс горных пород и др. Но все же основные причины проявления мощных техногенных землетрясений связаны с добычей газа, нефти, угля, бокситов, соли и других полезных ископаемых.

Приведем несколько примеров из наиболее известных катастрофических событий, происшедших на газовых, нефтяных и угольных месторождениях. В сейсмически безопасном районе в пределах газового месторождения и города Газли (1976 г.) произошло землетрясение силой 9-10 баллов по шкале Рихтера [1]. Газлийские сильные землетрясения происходили также в 1978 и 1984 гг. В районе г. Грозного (1971 г.) произошло 7-ми балльное землетрясение, по оценкам сейсмологов спровоцированное разработкой нефтяной залежи [1]. Сильные землетрясения сопровождали добычу нефти на Сахалине в районе городов Нефтегорск и Оха (1995, 1996 гг.). В конце 80-х годов множество слабых толчков фиксировалось в г. Нефтеюганске (асейсмичный район Западной Сибири), постоянные слабые землетрясения (до 4-х баллов) происходят на нефтяном месторождении Ромашкино (Татарстан). Как отмечают специалисты усиление сейсмической активности, рис. 1, совпало с началом применения новых методов извлечения нефти и газа – главным образом известного способа гидравлического разрыва пласта (фрекинг). Однако не сам фрекинг считают причиной сейсмической активизации, а наличие воды в подземных горизонтах, «где расположены более широкие и опасные разломы».

По мнению специалистов [1] отбор пластовых вод является наиболее реальной причиной сильных землетрясений, происшедших в 1952 г. в Калифорнии, в 1962 г. в Техасе, в 1966 г. в Ташкенте, в 1987 г. в Мексике.

При добыче бокситовых руд (Российская федерация) в течение последних двух десятков лет проявились мощные горные удары на Североуральском, Южно-Уральском, Соликамском, Высокогорском и других рудниках. По данным [2] причиной возможного проявления техногенных землетрясений являются превышающие критическую границу воздействия на литосферу добытая горная масса и размещенная в отвалы порода.

Землетрясение техногенного характера силой 5,6 балла произошло 18 июня 2013 г. на Бачатском угледобывающем карьере (Кемеровская область, Кузбасс). По мнению сейсмологов в угольных бассейнах Кузбасса проявляется тот же механизм генерации сильных землетрясений, что при нефтяных и плотинных факторах генерации сейсмичности.

Известно, что деление землетрясений на тектонические, вулканические и техногенные обусловлено характером физико-химических процессов, протекающих в их очагах. По современным представлениям тектонические землетрясения возникают вследствие резкого (или скачкообразного) снятия напряжения в земной коре. Вулканические землетрясения возникают в результате высокоскоростного выброса магматического расплава. Причины возникновения техногенных землетрясений и некоторые примеры их проявления были приведены выше.

Общепринятые физические модели подготовки землетрясений объясняют явления, предшествующие землетрясениям, и рассматриваются как средства прогноза. В основе одной из них лежит зависимость объемных деформаций от касательных усилий – развитие очага землетрясения объясняется дилатансией. Вторая – модель лавиноустойчивого трещинообразования, согласно которой увеличение скорости сейсмических волн обусловлено слиянием ориентированной системы трещин по мере роста нагрузок. Увеличение распространения упругих волн может быть обусловлено аномалиями импеданса за счет плотности и обводненности пород, изменения минерализации подземных вод, а также других факторов как следствия геодинамических процессов. Установлено, что отношение

скоростей продольных и поперечных волн перед землетрясением сначала уменьшается, а затем быстро возрастает. Эту закономерность используют в качестве прогнозного параметра. Однако, несмотря на многочисленные исследования причины возникновения землетрясений полностью не изучены.

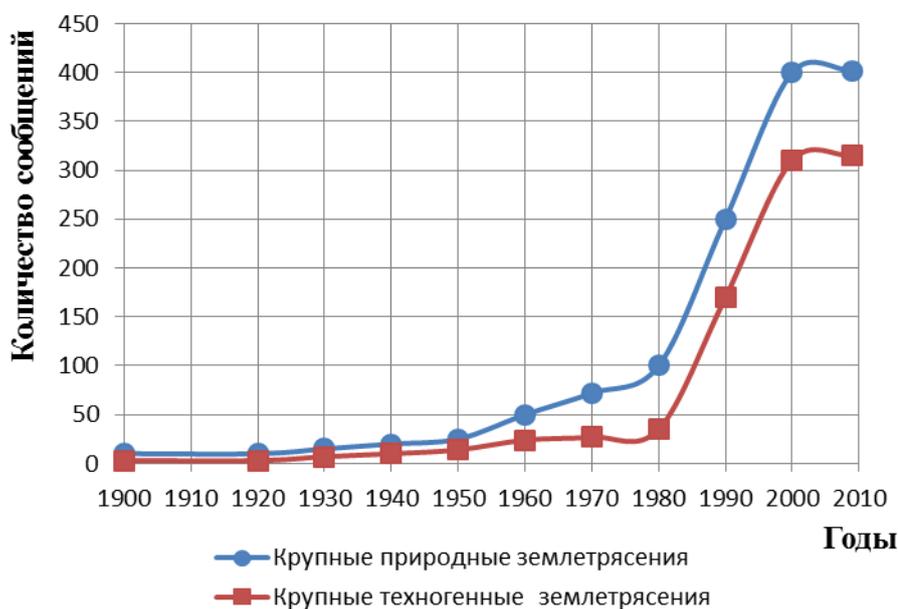


Рис. 1. Сообщение о крупных природных (1) и техногенных (2) землетрясениях

Цель работы состоит в предположении о ведущей роли электричества в развитии объемного очага землетрясения.

Анализ различных моделей подготовки землетрясений [1-8] свидетельствует о том, что существует принципиальное отличие подготовки техногенных землетрясений от землетрясений естественного происхождения – упругий запас в техногенном очаге формируется за счет внутренних физико-химических процессов, а в очаге естественного землетрясения – в основном, за счет тектонических сил (внешних механических). Причем, в первом и втором случаях формирование очага землетрясения путем накопления большого запаса энергии (независимо от того какие используются ресурсы – внутренние или внешние) можно связать с механизмом накопления запаса внутренней энергии кристаллами за счет увеличения плотности дислокаций. Как это, например, происходит при формировании выбросоопасного состояния в горных породах [9]. Это значит, что накопившуюся энергию можно представить как вполне конкретный образ – электрические заряды. Дислокации в кристаллах возникают при любых механических воздействиях, но особенно интенсивное увеличение их плотности происходит в условиях сложного деформирования, например, при сжатии со сдвигом. С точки зрения теории дислокаций касательные напряжения, вызывают пластическую деформацию и приводят к увеличению концентрации дефектов кристаллической решетки (дислокаций, вакансий). При этом рост внутренних напряжений, препятствующих внешним приложенным напряжениям, приводит к росту плотности дефектов до критических значений, при которых кристалл начинает разрушаться.

Механические воздействия на массив пород приводят к формированию не только кристаллических зерен породы с запасом внутренней энергии, но и накоплению электрических зарядов на межзерновых поверхностях и в границах контактирующих слоев породы. Поэтому особенно в сейсмоактивных районах, в породах, характеризующихся как выбросо- и удароопасные, производство взрывов обязательно приводит к усилению потенциала активного состояния. Негативными примерами являются испытания подземных ядерных зарядов в районе г. Семипалатинска и взрыв ядерного заряда, произведенный для

«снятия» выбросоопасного потенциала в угольных пластах поля шахты «Юнком», г. Енакиево.

Сам по себе процесс накопления зарядов на границе слоев породы ничего не говорит о возможных катастрофах, однако, растущая плотность поверхностных зарядов, превысившая некоторое критическое значение, приводит к электрическому пробоя, сопровождающемуся возникновением ударной волны. Относительно возможного электрического пробоя в земных недрах говорил А.А. Воробьев, и согласно которому в земных недрах могут существовать «высокие электрические поля» [10; 11]. Существование таких полей в активных сейсмических зонах не вызывает сомнений, поскольку они являются источниками появления электрических возмущений в атмосфере и ионосфере [12; 13].

Практически для всех землетрясений объединяющим физическим параметром является резкое, иногда превышающее местную скорость звука высвобождение энергии, накопленной в очаге. Если возмущения превышают местную скорость звука, то в породе возникает ударная волна.

Некоторые физические явления, предшествующие и сопутствующие землетрясениям, подтверждают проявление электрических эффектов, а возможно, и их важную роль непосредственно в формировании очага землетрясений:

- акустическая эмиссия, проявляющаяся при возникновении и развитии дефектов, разрушении пород [14];
- тектономагнитный эффект, формирующийся в процессе образования полосы сдвига [15];
- свечение атмосферы накануне сильного землетрясения [16];
- атмосферное электричество (возмущение геоэлектрического поля накануне землетрясения);
- вариации электрического поля (временные и спектральные характеристики квазистатического электрического поля в периоды активизации сейсмических процессов) [17];
- радиосияния над разломами – результат сильных возмущений в ионосфере; вызываются увеличением количества электронов [18];
- возмущения в ионосфере наблюдаются перед началом землетрясения (происходит усиление квазистатического электрического поля) [19];
- сейсмамагнитосферные эффекты и частицы высокой энергии наблюдаются над эпицентром землетрясения [20].

Возникновение электрических токов в горных породах и проявление электрических эффектов обусловлено связанными непосредственно между собой различными физико-химическими процессами, протекающими в земной коре и в атмосфере. Например, в периоды тектонической активности в результате распространения упругих волн в горных породах возникают различные тепловые и электрические явления [21-23].

Важным фактором возникновения электрических процессов является степень неоднородности пород и геологических образований. Широко распространены имеют локальные электрические поля, действующие в небольших объемах породы, и микрогальванические – имеющие наименьшую сферу действия [24]. Электрические поля возникают между гранями кристаллов с неодинаковыми электродными потенциалами, на границах минералов, в пьезооптических минералах при тепловых, механических и других воздействиях. Геологические процессы, протекающие в горных породах, обусловлены не только действием температуры, давления, состава флюидов, но и дополнительным влиянием на эти процессы слабых электрических и магнитных полей [25; 26].

Контактная разность потенциалов возникает на границе горных пород в широком диапазоне температур, при этом, в процессе трения, скольжения или контакта электризуются все вещества: диэлектрики, полупроводники, металлы. Однако степень их электризации будет различна. Так, при исследовании электризации различных породообразующих

минералов установлена зависимость знака и величины заряда от состава и размера частиц [21-24].

По данным [21] для всех минералов наблюдается примерно одинаковая зависимость величины заряда от степени дисперсности. Плотность заряда на поверхности частиц колеблется в зависимости от размера частиц: для мусковита при размере частиц 0,5...0,25 мм заряд равен $134,3 \cdot 10^{-11}$ Кл/см³; у частиц кварца размером 0,005...0,003 мм заряд составляет $0,246 \cdot 10^{-11}$ Кл/см³; для гипса заряд $\sim 20,5 \cdot 10^{-11}$ Кл/см² соответствует размеру частиц от 0,25...0,1 мм, однако в три раза заряд уменьшается, если размер частиц достигает 1,0...0,5 мм.

Электрические свойства горных пород и электрические явления, протекающие в массиве пород, играют заметную роль не только в процессах минерало- и рудообразования [21-24], но и в определении состояния устойчивости пород в целом [26-28]. Снижение степени устойчивости пород горного массива обусловлено необратимыми изменениями физических параметров (например электрических), химической активности. Предполагается, что такие изменения могут быть одной из причин, а возможно, и основной, инициирующей зарождение и развитие нестабильных очагов – землетрясений (в том числе, техногенного характера [29]), выбросоопасных пород и углей, других газодинамических явлений в шахтах.

Таким образом, одним из актуальных вопросов является исследование физических причин, потенциально способных инициировать возникновение деструктивных процессов в горных породах и ответственных за изменения состояния устойчивости, как в локальных участках, так и в массиве пород в целом. В связи с этим, нам кажется целесообразным показать, что даже без механических воздействий на границах материалов возникает разность электрических потенциалов.

На границе двух твердых материалов возникновение свободных зарядов может быть обусловлено различным распределением электронной плотности в каждом из материалов [28]. В природе это явление должно быть особенно характерным для массива горных пород – системы, образованной различными фазами и с различным значением электропроводности. В горных породах значительное ускорение физико-химических процессов могут играть сдвиговые деформации.

Для исследований термо-ЭДС выбраны две пары материалов: графит – сталь (0,62% углерода), графит – α -железо (0,018% углерода). В исследовании в качестве активного углеродного материала использовались: спектрально-чистый искусственный графит марки С-3. Выбор материалов обусловлен главным образом хорошо изученной диаграмме состояния «железо-углерод». Использовалась методика, приведенная в [25-27]. Поскольку концентрации свободных электронов в графите и железе имеют различное значение, поэтому существует большая вероятность наличия электрических зарядов на фазах железа. Исследуемые пары материалов нагревались до температуры 1300 К. Температура контролировалась термопарой хромель-алюмель. Результаты измерений термо-ЭДС приведены на рис. 2.

По значениям измеренных термо-ЭДС (термоэлектрический эффект) определялся коэффициент термо-ЭДС α_{1-2} , характеризующий концентрацию электронов N_1 и N_2 в графите и железе соответственно [10]:

$$\alpha_{1-2} = (k/e) \ln(N_1/N_2), \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; e – заряд электрона, $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; концентрация электронов в железе составляет $N_2 \approx 10^{28}$ м⁻³, в графите $N_1 = (10^{23} \dots 10^{25})$ м⁻³.

В случае равенства кинетических энергий электронов, находящихся в железе и графите, зависимость для контактной разности потенциалов можно записывать в виде [28]:

$$\Delta\varphi \approx (kT/e) \ln(N_1/N_2). \quad (2)$$

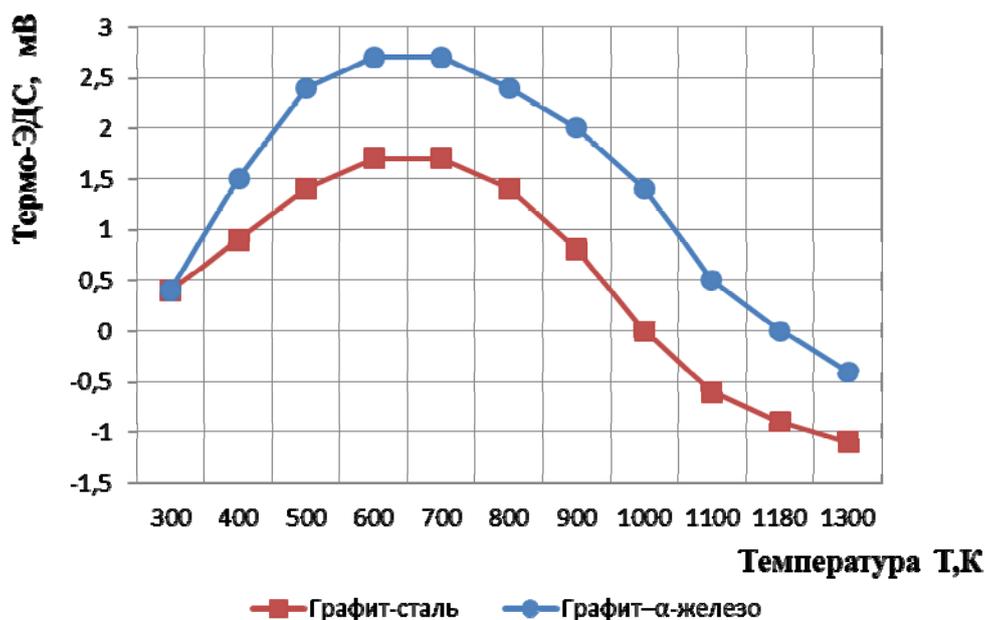


Рис. 2. Закономерность изменения термо-ЭДС на контактной границе: 1 – графит– α -железо; 2 – графит–сталь

На рис. 3 показано изменение контактной разности потенциалов с изменением температуры нагревания исследуемых пар материалов.

При $T < 1000$ К поверхность графита, контактирующая с поверхностью железа, имеет положительный заряд, обусловленный недостатком электронов. Поверхность зерна железа приобретает отрицательный заряд. Контактная разность потенциалов для пары *графит – α -железо* при температуре 300 К достигает +4,7 мВ, для пары *графит – сталь* разность потенциалов составляет +3 мВ. При переходе α -железа в γ -железо наступает равновесие между этими фазами и контактная разность потенциалов составляет $\Delta\phi = 0$ мВ. Как видно из рис. 3, $\Delta\phi$ для разных пар материалов будут отличаться, поскольку содержание углерода в исходных сталях отличается почти в 35 раз. В результате температурного фазового перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ поверхность железа заряжается положительно, а недостаток электронов компенсируется за счет углерода, растворяющегося в γ -решетке железа: решетка железа отбирает атомы углерода у графита, как у донора электронов. При дальнейшем повышении температуры графит заряжается отрицательно. Контактная разность потенциалов при $T = 1300$ К составляет –2,4 мВ.

Контактная разность потенциалов на границе графит-железо с учетом известной диаграммы состояния Fe-C свидетельствует о том, что её положительные значения соответствуют α -фазе железа (графит является акцептором, а железо донором), $\Delta\phi = 0$ соответствует равновесию между α и γ состояниями, а отрицательные значения $\Delta\phi$ соответствуют γ -фазе железа (графит является донором, а железо акцептором электронов). Как видно, изменения разности потенциалов на поверхностях контакта от температуры меняет состояние термодинамической устойчивости данной системы и состояние равновесия электронных плотностей контактирующих фаз.

Наличие электрических зарядов на поверхности диэлектрической микрочастицы предполагает флуктуации формы, т.е. явление неустойчивости поверхности частицы, спонтанный рост новообразований на поверхности, а также зависимость размера частицы от плотности распределения зарядов на её поверхности.

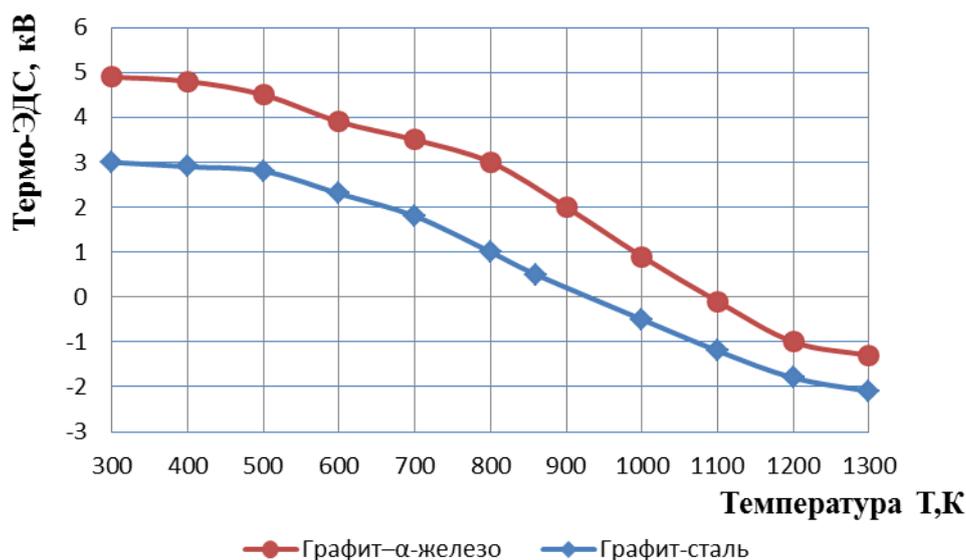


Рис. 3. Характер изменения контактной разности потенциалов на границе материалов:
1 – графит-α-железо; 2 – графит-сталь

Выводы. Экспериментально установлено, что на границе двух различных материалов с электронным типом проводимости возникает разность электрических потенциалов, значение которой зависит от температуры.

Одним из основных механизмов формирования зарядов на поверхностях твердых тел является контактная разность потенциалов, зависящая от температуры и концентрации электронов в контактирующих твердых телах. При этом известно, что на границах материалов возникновение электрических зарядов и разности потенциалов в межграничной области может быть инициировано механическими воздействиями. Например, в результате прохождения ударной волны, упругих волн, трения, скольжения, сжатия со сдвигом и т.д.

Насыщение породного массива избыточным запасом энергии главным образом заключается в увеличении концентрации зарядов в дефектах микроструктуры и межзерновых границах минералов, на межфазных границах и на межслойных поверхностях пород. Насыщение зарядами достигается как последовательными, так и одновременными воздействиями различных механических и физических факторов, «быстрой» заменой вещественного состава фазы, заполняющей поровое пространство, и др. Предполагается, что основные физико-химические процессы формирования в массиве пород очага, характеризующегося состоянием неустойчивости, обусловлены электромагнитными эффектами.

Список литературы

1. Царев В.П. Внимание! Техногенные землетрясения // Наука и человечество. Международный ежегодник / В.П.Царев, Р.П.Повилейко. –М.: Знание, 1990. –С. 126–130.
2. Короновский Н.В., Абрамов В.А. Землетрясения: причины, последствия, прогноз // Саратовский образовательный журнал, 1998. – №12. – С.34–41.
3. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. – М.: Наука, 2006, – 254 с.
4. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. – М.: Наука, 1993. – 312 с.
5. Болт Б. А. Землетрясения. – М.: Мир, 1981. –256 с.
6. Мячкин В. И. Процессы подготовки землетрясения. – М.: Наука, 1978. –232 с.
7. Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель землетрясения (1). Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. – 2009. – №6. – С. 87-96.

8. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – М.: МИФИ, 2000. – 237 с.
9. Соболев В.В. Физическая механика выбросоопасных углей / В.В. Соболев, А.В. Чернай, В.В. Зберовский и др. – Запорожье: ПРИВОЗ ПРИНТ, 2014. – 304 с.
10. Воробьев А.А. Физические условия залегания и свойства глубинного вещества. (Высокие электрические поля в земных недрах). – Томск: Изд-во ТГУ. 1975. – 296с.
11. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Изд-во ТГУ, 1980. – 211с.
12. Дари Ж. Электричество во всех его проявлениях. – СПб, 1903. – 448с.
13. Гохберг М.Б. Источники электромагнитных предвестников землетрясений / М.Б. Гохберг, И.Х. Гуфельд, И.П. Добровольский // Докл. АН СССР. – 1980. – Т.250, №2. – С.323–326.
14. Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения [Текст]: дис. канд. физико-математических наук: 01.04.06 / Купцов, Анатолий Владимирович. – с. Паратунка Елизовского района Камчатской области, 2006. – 95 с.
15. Гарагаш И.А. Модель формирования тектономагнитного эффекта в зоне разлома при сдвиге // Российский журнал наук о Земле. – 1999. – Т. 1. № 3. – С.37-42
16. Duncan P. Earthquake Lights or Lightning, is a well-documented phenomena// http://www.nzherald.co.nz/christchurchearthquake/news/article.cfm?c_id=1502981&objectid=10673092.
17. Roder H., Braun T., Schuhmann W. et al.(2005), «Great Sumatra earthquake registers on electrostatic sensor», EOS. Trans. AGU, vol. 86, no. 45, pp. 445-460.
18. Шафтан В.А. Обнаружение пространственных зон генерации атмосферных неоднородностей сейсмическими явлениями / В.А. Шафтан, М.Ф. Злотников, Ю.И. Виноградов, Е.П. Чигин // Магнитосферные исследования. – 1986. М.: Наука № 8. – С. 126-129.
19. Гохберг М.Б. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений / М.Б. Гохберг, В.А. Моргунов, Е.А. Герасимович, И.В. Матвеев. – М.: ИФЗ., 1985. – 116 с.
20. Гальперин Ю.И. Высыпание энергичных заряженных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения / Ю.И. Гальперин, В.А. Гладышев, Н.В. Джорджио и др. // Косм.иссл. –1992. Т. 30. Вып 1. С. 89-106.
21. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.
22. Пархоменко Э.И. Явления электризации в горных породах. – М.: Наука, 1968. – 255 с.
23. Пархоменко Э.И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. – М.: Наука, 1989. – 198 с.
24. Нюссик Я.М. Электрохимия в геологии / Я.М. Нюссик, И.Л. Комов. – Ленинград: Наука, 1981. – 240 с.
25. Пивняк Г.Г. Фазовые превращения в каменных углях при воздействии слабых электрических и магнитных полей / Г.Г. Пивняк, В.В. Соболев, А.О. Филиппов // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 5. – С. 43–49.
25. Соболев В.В. Образование новых фаз в измельченном кальците с добавками кремния при нагревании и пропускании электрического тока // Минералогический журнал. – 2008. – №4. – С. 25–32.
27. Соболев В.В. Влияние слабого электрического поля на фазовые и структурные превращения в горных породах и минералах // Форум гірників – 2014: матеріалі міжнар. конф., 1-4 жовтня 2014 р., Дніпропетровськ.– ТОВ «ЛізуновПрес», 2014. – Т. 2. – С.22-31.
28. Алексеев Г.Н. Преобразование энергии. – М.: Наука, 1966. – 189 с.
29. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. – Королёв, М.О.: ЦНИИМаш, 2007. – 160 с. ISBN 978-5-85162-066-9.