

О регистрации спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы в протяженной соляной штольне

© И. Г. Захаров, В. Н. Шуман, 2014

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 14 января 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Наведено результати вимірювань імпульсного потоку електромагнітного випромінювання в діапазоні частот 2,5—50 кГц (на рівні 3 дБ) у прямолінійній горизонтальній частині штольні завдовжки 700 м, розміщеної на глибині 260 м і позбавленої техногенних збудників завад. Синхронно та однотипним приладом проведено реєстрацію імпульсного потоку випромінювання в пункті спостереження, розміщеного на денній поверхні над штольнею. Виконано також несинхронні вимірювання імпульсного потоку вздовж профілю, розташованого на денній поверхні під гострим кутом до азимута штольні. Виділено компоненту спонтанної електромагнітної емісії літосферного походження, не спотворену збудниками атмосферно-іоносферно-магнітосферного походження. Подано порівняльний аналіз записів імпульсного потоку, одержаних на денній поверхні та в штольні, глибина якої перевищує товщину скін-шару в діапазоні частот 2,5—50 кГц, та їх геолого-геофізичну інтерпретацію.

Ключові слова: спонтанна електромагнітна емісія, активні дисипативні системи, геолого-геофізична інтерпретація, літосферні джерела випромінювання.

Введение. Как свидетельствует обширный эксперимент, на границе «земля—воздух» наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений различной природы, регистрируемых в исключительно широком диапазоне частот — от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше. Одни из них возбуждаются источниками в атмосфере (грозовые разряды, предгрозовое излучение, непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков и циклонов), другие — в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу из межпланетной среды, третьи генерируются внутриземными источниками [Atmospheric..., 1999; Сурков, 2000; Gerhenson, Bambakidis, 2001; Гульельми, 2007; Шуман, 2011; 2012]. При этом шумоподобная компонента электромагнитного излучения литосферного происхождения составляет заметную долю в общем регистрируемом поле естественного происхождения.

Исторически сложилось так, что наибольший интерес с точки зрения геофизических приложений вызывали исследования по происхождению и свойствам — УНЧ (частотный диапазон до 3 Гц) и КНЧ (диапазон 3—30 Гц) электромагнитных полей в земле, атмосфере, ионосфере, магнитосфере и космосе [Сурков, 2000]. При этом основное внимание уделялось

возможности их использования для прогноза надвигающихся природных катастроф (землетрясения, цунами и др.). Теоретические исследования генерации УНЧ и КНЧ электромагнитных полей крупномасштабными тектоническими процессами, приводящими к деформации и разрушению пород, слагающих земную кору, охватили широкий круг явлений и эффектов. Это ударная поляризация и намагничивание горных пород, эмиссия заряженных частиц при их разрушении, индукционный и сейсмомагнитный эффекты, обусловленные распространением сейсмических волн, генерация различных шумов во время землетрясений и др. [Сурков, 2000].

Отмечается, что генерация электромагнитного излучения происходит как спонтанно, вне прямой связи с проявлением сейсмичности, так и вынужденно, вследствие подвижек горных пород при сейсмическом воздействии [Левшенко, 1995; Сурков, 2000; Гульельми, 2007]. Предложена схема классификации вынужденных сигналов [Левшенко, 1995].

В последние годы наметился заметный прогресс в исследовании природы спонтанной (по классификации В. Т. Левшенко [Левшенко, 1995]) электромагнитной эмиссии, генерируемой литосферой в широком диапазоне частот (СЭМЭЛ), в том числе в изучении ее сход-

ства и различия с естественным импульсным электромагнитным полем Земли (ЕИЭМПЗ), изучаемым, начиная с классических работ А. А. Воробьева.

Установлено, что интенсивность СЭМЭЛ контролируется в общем случае суммарным действием внешних и внутренних сил. Ее характеристики определяются частотным диапазоном, районом регистрации, резонансными и релаксационными процессами, свойствами и процессами исследуемого массива или блока горных пород. Наблюдается ее модуляция приливной силой [Левшенко, 1995].

Разработана теория, позволяющая объяснить ряд особенностей сейсмоэлектромагнитной эмиссии (шума). С учетом согласования радиусов приема и характера ослабления при ее распространении в проводящей геосреде основная идея теоретического рассмотрения состояла в том, что рост трещин в горном массиве, подвергающимся разрушению, сопровождается акустическим излучением и подвижками проводящей среды в геомагнитном поле, приводит к генерации токов, которые возмущают магнитное поле таким образом, что эффективные моменты всех трещин оказываются ориентированными противоположно вектору магнитной индукции \mathbf{B} поля земного ядра. Возникает своеобразный эффект когерентного усиления электромагнитного поля, генерируемого ансамблем (системой) трещин [Сурков, 2000; Surkov, Hayakawa, 2006].

Другой механизм возникновения электромагнитного шума связывают с электрокинетическим эффектом, возникающим при деформации пористых сред, насыщенных водой. Эффект обусловлен тем, что часть ионов жидкости адсорбируется на стенках пор и трещин. Ионы противоположного знака, остающиеся в объеме жидкости, могут перемещаться под действием градиента порового давления, создавая тем самым электрокинетический ток [Сурков, 2000].

Развита теория электрокинетического эффекта в пористых водонасыщенных породах с фрактальной структурой порового пространства за порогом перколяции (протекания) [Surkov, Tanaka, 2005].

Очевидно, при изучении электромагнитных полей этого типа, выяснения их основных свойств и механизмов генерации важное значение имеют исследования электромагнитных и геоакустических шумов, регистрируемых в глубоких скважинах, пробуренных в толщах магматических, метаморфических и осадоч-

ных пород, выполненные в конце прошлого и начале нынешнего столетий рядом научных организаций (см., например, [Дьяконов, Троянов, 1998]).

Установлено, что геоакустические и электромагнитные шумы могут служить чувствительным индикатором геоструктур с активной современной динамикой. Отмечено, что в глубоких скважинах свыше 2 км изменения уровня шумов с глубиной отражают особенности распределения динамических процессов. При этом в массивах кристаллических пород их уровень имеет тенденцию к росту с глубиной. Наивысшие уровни шумов обычно коррелируют с интервалами повышенной трещиноватости пород. В осадочных образованиях дифференциация шумов с глубиной значительно ослаблена, резко возрастая лишь в пределах продуктивных горизонтов нефтяных месторождений.

Наблюдался также временной тренд в интенсивности геоакустических и электромагнитных шумов. Их мониторинг позволил также выделить ряд периодов собственных колебаний Земли, включая и длиннопериодные. Обнаружена многолетняя циклическая миграция интенсивности акустической эмиссии.

В итоге стала очевидной обоснованность представлений о множественности механизмов генерации сейсмоакустических и электромагнитных возмущений литосферной природы. Кроме того, как свидетельствует обширный полевой эксперимент, возмущения этого типа обладают рядом весьма специфических свойств, которые не находят должного объяснения в рамках упомянутых выше теорий генерации, в частности, прежде всего решить проблему их выхода на дневную поверхность из глубин, превышающих мощность скин-слоя в рассматриваемом (в частности, килогерцовом) диапазоне частот [Богданов и др., 2009; Старостенко и др., 2009; Шуман, 2010а,б; Шуман и др., 2011; 2012].

Стало очевидным, что адекватная интерпретация этих особенностей весьма проблематична в рамках стандартных подходов. Здесь требуется иная электродинамическая основа, иная электродинамическая модель геосреды — активной диссипативной системы с диффузией. Неравновесность, нелинейность, неустойчивость геосреды — вот те основные исходные принципы, на которых, по нашему мнению, должна строиться теория спонтанной электромагнитной и геоакустической эмиссии литосферы.

Как известно, одна из моделей генерации шумов — флуктуаций геоакустической и электромагнитной эмиссии горных пород — связана с перколяционной моделью диффузионного фронта. Напомним в этой связи известную теорему статистической физики: механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций.

Установлено также, что модель фронта градиентной скалярной перколяции в принципе позволяет дать физическую интерпретацию наблюдаемых параметров сейсмоакустического шума как неравновесного самоорганизованного критического явления, а ассоциируемый с этим фронтом диссипативный всплеск диэлектрической проницаемости при рассеивании на зарядах, сгустках зарядов или диполей, находящихся в геосреде, в свою очередь формирует широкодиапазонный фрактальный спектр электромагнитного излучения. Существенно, что на энергетических потоках в геосреде могут возникать статические, пульсирующие или распространяющиеся области концентрации флюида. При этом сейсмичность любого ранга индуцируется фоновыми полями и обусловлена неравномерностью восходящих флюидных (в том числе, газовых) потоков [Гуфельд, 2007]. При этом образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого в них излучения.

Обратим внимание на важное обстоятельство: при возникновении в среде электромагнитного поля (в результате любого механизма его генерации) в дальнейшем оно распространяется в ней в соответствии с уравнениями Максвелла. Иное дело для связанных акустоэлектромагнитных состояний или волн, которые могут возникать в активных диссипативных системах с диффузией. Их распространение описывается системой уравнений, в которой уравнения Максвелла — только их составная часть. Весьма вероятно, что акустосейсмоэлектромагнитный шум может быть истолкован в терминах автоколебаний — незатухающих колебаний, поддерживаемых внешними источниками энергии в нелинейной диссипативной системе, вид и свойства которых определяются самой системой (геосредой). Сама же структура спектра колебаний определяется масштабами, ограничивающими диапазон проявления фрактальных свойств среды и значением спектральной размерности. Очевидна также общность и взаимосвязь процессов генерации и распространения сейсмоакустического и электромагнитного шумов литосферы.

Измерение СЭМИ в штольне. Многообразие источников электромагнитных возмущений вблизи границы «земля—воздух», сложности математического описания нелинейных процессов генерации и распространения электромагнитных сигналов литосферного происхождения порождает определенный скептицизм в восприятии новых идей, а иногда и полное отрицание наличия сигналов со свойствами, которые не могут быть объяснены в рамках классической электродинамики сплошных сред. Исходя из этого, представляется актуальным и целесообразным провести такой эксперимент, который бы позволил увидеть и выделить компоненту электромагнитной эмиссии литосферного происхождения килогерцового диапазона, так сказать, в чистом виде, не зашумленным излучением источников атмосферно-ионосферно-магнитосферного происхождения. Очевидно, один из возможных доступных и простых путей решения этой задачи — выполнить измерения пространственного распределения интенсивности импульсного потока излучений в толще земной коры, в частности, вдоль штольни, расположенной на глубине, превышающей мощность скин-слоя, оцениваемого в приближении падающей на границу раздела «земля—воздух» плоской волны в диапазоне рассматриваемых частот. В этом случае сигналы внешнего происхождения рассматриваемого диапазона будут подавлены или отсутствовать вовсе. Такой эксперимент и был выполнен авторами 3 августа 2010 г.

Измерения проводились в соляной шахте г. Соледар Донецкой обл. в прямолинейной горизонтальной части штольни на глубине примерно 260 м. Площадь выполнения работ находилась на юг от железнодорожного останочного пункта «55 км» (рис. 1).

Длина подземного профиля Б—Б' примерно 700 м. Длина наземного профиля А—А' — 807 м; из-за сильной техногенной помехи проводилась обработка части профиля А—А' длиной 655 м. Во время проведения подземной съемки на поверхности в месте пересечения профилей, обозначенного на схеме буквой К, располагалась вариационная станция.

Ширина и высота штольни 4,5 м. Штольня сухая; температура примерно 15°C, неукрепленная, по всей длине она без металлических деталей крепления; рельсы отсутствуют. Электричество также отсутствует полностью, т. е. ни силовых кабелей вдоль нее, ни кабелей освещения нет. В настоящее время работы на данном участке шахты не проводятся. Таким



Рис. 1. Место проведения эксперимента: А—А' — наземный профиль; Б—Б' — подземный профиль.

образом, измерения проводились при отсутствии источников помех.

Измерения проводились прибором «Астрогон» (ТУ У 33.2–34476090–001: 2009) производства ООО «Юг-нефтегазгеология». Импульсное электромагнитное излучение в диапазоне частот 2,5–50 кГц (по уровню 3 дБ) оценивалось по интегральной интенсивности потока импульсов. Динамический диапазон измерений параметров геомагнитных флуктуаций составлял 0,055–15 нТл [Шуман и др., 2012], интервал измерения — 1 с.

Всего по подземному профилю было выполнено четыре серии измерений — по два в прямом и обратном направлениях. Выполнялась пешеходная съемка со средней скоростью примерно 1,1 м/с. К сожалению, в штольне невозможно обеспечить координатную привязку точек замеров с использованием GPS-приемника, что заметно осложнило анализ и интерпретацию полученного материала.

Одновременно однотипным прибором проводилась регистрация импульсного электромагнитного излучения на дневной поверхности в месте пересечения наземного и подземного профилей. Благодаря предварительно выполненной синхронизации работы приемников осуществлена точная временная привязка подземных и наземных измерений.

Кроме того, до проведения измерений в штольне проведены измерения по профилю А—А' на дневной поверхности, который проходит под острым углом к направлению штольни (строго вдоль штольни провести измерения оказалось невозможным).

Геологическое строение территории в районе выполнения работ. В геологическом отношении район работ расположен в пределах соленосной провинции Бахмутской котловины. В районе месторождения представлены каменноугольные, пермские, третичные и четвертичные отложения. Соленосная Славянская свита P_1sl в пределах артемовского месторождения каменной соли имеет мощность 350–500 м и залегает согласно на подстилающих ее породах Никитовской свиты. Она представлена комплексом чередующихся между собой пластов каменной соли, ангидритов, гипсов, аргиллитов, алевролитов, известняков и доломитов. Преобладают хемогенные породы (каменная соль, ангидрит, гипс). Падение слоев пород северо-западное под углом 2–5° [Антипова, 1962; Стратиграфічний..., 1997; Пырин, 2003].

Продуктивная толща Артемовского месторождения каменной соли стратиграфически приурочена к средней и верхней частям Славянской свиты. Мощность ее варьирует от 171 до 294 м. Толща содержит пять пластов каменной соли (снизу вверх): Подбрянцевский (мощностью около 30 м), IV (7,5 м), III (11 м), Брянцевский (40 м) и Надбрянцевский (до 25 м). В кровле и подошве соляных пластов (за исключением кровли Надбрянцевского пласта) залегают ангидриты, т. е. пласты каменной соли находятся в ангидритовых «рубашках». В кровле Надбрянцевского пласта залегает известняк. Углы падения соляных пластов 2–5° (погружаются в северном, северо-западном и западном направлениях) [Пырин, 2003].

В разрезе ниже Подбрянцевского пласта залегает группа пластов каменной соли небольшой мощности (от 3 до 6–8 м), получивших название Карфагенских, в подошве которых залегает маркирующий горизонт S_1^1 . Соленосная толща практически безводная, за исключением глубин примерно до 100 м, где наблюдается проникновение грунтовых вод. Естественные рассолы в гипсоносной толще на этих глубинах были первоначальным объектом эксплуатации на месторождении до начала подземной разработки в 1881 г. [Пырин, 2003]. На большой глубине водоносные пласты начинаются на глубине 150 м ниже подошвы основных пластов соли.

Каменная соль продуктивных пластов очень плотная, крупнокристаллическая, обычно чистая, с тонкими годовыми глинисто-ангидритовыми прослоями, так называемыми годичными слоями. В разрезе соленосной толщи отмечены и сравнительно маломощные пласты соли в пределах от 1 до 10, иногда 15 м. Всего выделяют 18—19 пластов каменной соли общей мощностью 180 м, или 50 % мощности всей соленосной толщи.

Залегающая ниже Никитовская свита P_1mk объединяет отложения, относимые ранее к составу известняково-доломитовой свиты. Слагается свита в основном песчано-глинистыми отложениями, среди которых залегают пласты гипса, ангидрита и карбонатных пород. Верхняя граница свиты представлена известняком (доломитом) S_1 . В районе Артемовского месторождения вблизи границы свит имеется резко выраженный контакт песчано-глинистой толщи с галогенными отложениями.

Выше соленосной толщи залегают преимущественно песчано-глинистые отложения перми (маломощная краматорская свита) и выше лежащих отложений; их суммарная мощность в месте проведения работ составляет 40—60 м.

Тектонические нарушения в районе работ наблюдаются сравнительно редко и выражены слабо. Имеются признаки пликативных движений в породах верхнего карбона и низах перми с нарушением их залегания в виде асимметричных складок [Антипова, 1962].

Результаты измерений и их геолого-геофизическая интерпретация. При выбранных величинах порога и коэффициента усиления на поверхности регистрировалось около 10 000 импульсов в секунду, в шахте — 20÷50 импульсов, что лишь в 1,5—2 раза превышает собственный шум прибора. Такие низкие значения в шахте можно объяснить, прежде всего, наличием в непосредственной близости от приемника хорошо проводящих соляных отложений, которыми выложены пол, стены и кровля штольни.

Закон распределения показаний прибора в шахте близок к нормальному (рис. 2), со слабой, но неизменной асимметрией; по каналам X и Y отмечается также стабильное снижение частоты встречаемости значений вблизи среднего значения. Возможно, закон распределения представлен сложением двух распределений: нормального собственного шума прибора (с вероятностью 95 %, собственный шум прибора не превышает 28 импульсов) и нормального (с асимметрией) природного.

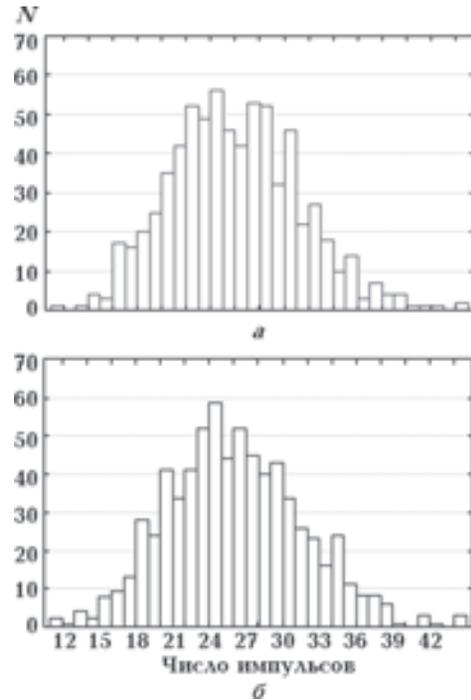


Рис. 2. Распределение числа импульсов по частоте встречаемости в канале X: а — серия измерений № 3; б — серия измерений № 4.

Учитывая сложность вопроса разделения сигналов от литосферных и внелитосферных источников, прежде всего рассмотрим связь наземных и подземных измерений. Все без исключения сеансы одновременных наблюдений (всего около 2 ч одновременных наблюдений) указывают на отсутствие какой-либо связи между показаниями приборов на поверхности и в шахте. На рис. 3 в качестве примера приведены данные для третьей серии измерений по линии подземного профиля и синхронные измерения стационарной станции, установленной над штольной на поверхности (канал X): коэффициент корреляции между изменениями показаний прибора на поверхности и в шахте равен нулю; не установлено ни одного подобного одновременного всплеска. Для других каналов ситуация аналогичная. Можно с уверенностью утверждать, что на данной глубине и для данных геоэлектрических характеристик разреза сигнал от естественных и искусственных источников внелитосферного происхождения в диапазоне частот 2,5—50 кГц в штольне отсутствует. Соответственно, зарегистрированный сигнал может быть обусловлен только источниками внутри литосферы.

Как показывает практика полевых работ, повторяемость результатов измерений мето-

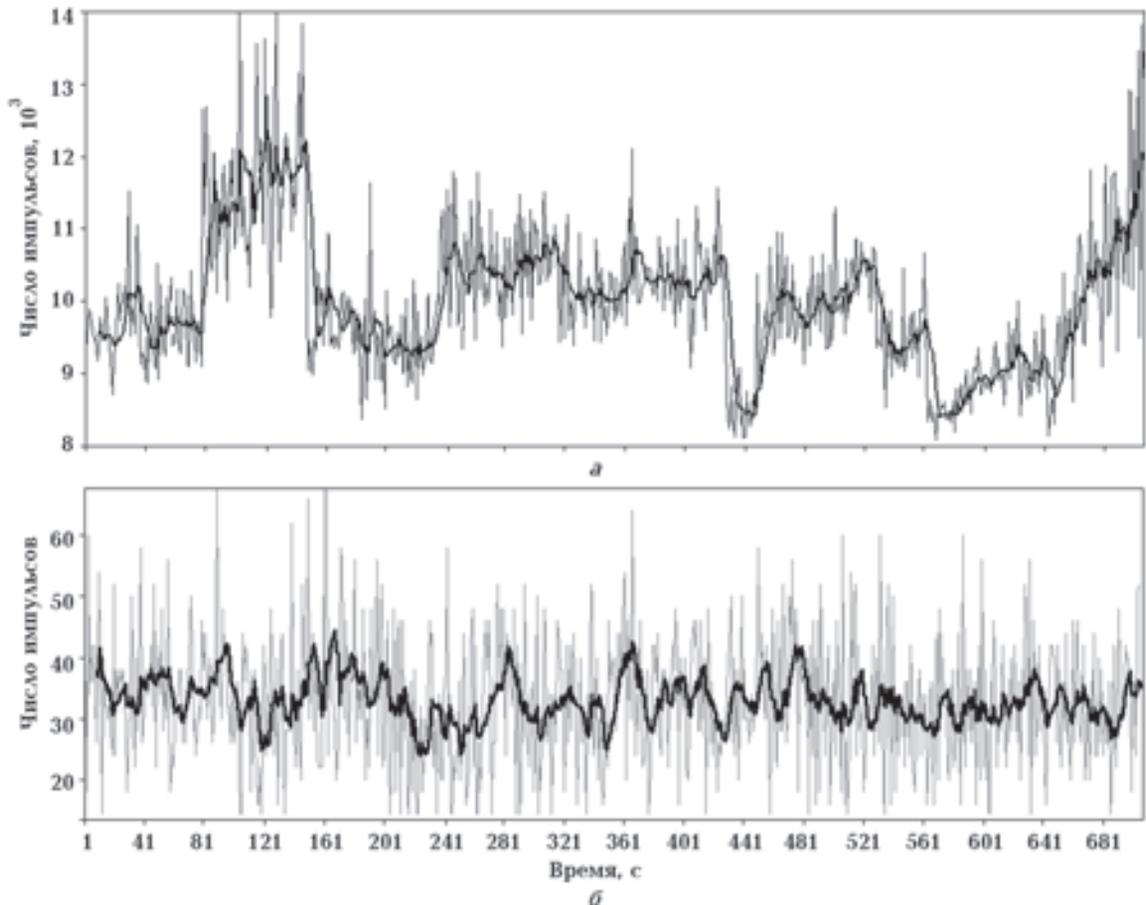


Рис. 3. Сопоставление синхронных наземных (а) и подземных измерений (б) по каналу X во время третьей серии измерений.

дом АСЭМЭЗ недостаточно высокая, что обусловлено, прежде всего, наличием в суммарном сигнале сигналов от разных источников излучения, многие из которых испытывают существенные временные вариации, причем доля литосферного сигнала составляет, как правило, примерно лишь 20 % от суммарного сигнала. В шахте, где другие источники излучения были исключены, следовало бы ожидать более высокой повторяемости. К сожалению, отсутствие координатной привязки и разная скорость передвижения по профилю во время каждого из прохождений существенно затруднили сравнение проведенных серий измерений. Тем не менее, поскольку основные различия скорости перемещения приходились на начало и конец профиля, центральные части профилей удалось сопоставить.

На рис. 4 показан пример сопоставления результатов измерений на большей части профиля при проведении измерений 3-й и 4-й серий. Неслучайность флуктуаций в показаниях при-

боров представляется очевидной: несмотря на шумовой по природе характер сигнала, его изменения по профилю очень схожи; несколько различающаяся ширина однотипных участков обусловлена различием скорости перемещения по профилю.

Таким образом, есть все основания для проведения геолого-геофизической интерпретации полученных результатов, которая была выполнена по данным как наземной, так и подземной съемок. Для снижения влияния неравномерности движения по профилю данные подземных измерений предварительно сглаживались скользящим средним по пяти точкам. Подготовленные для интерпретации материалы включали распределение вдоль профиля по глубине положения ожидаемых локальных излучателей, для каждого из которых определялась интенсивность потока импульсов, которая принималась пропорциональной амплитуде аномалий и по которым рассчитывалось их положение. Далее проводился расчет «теневых»

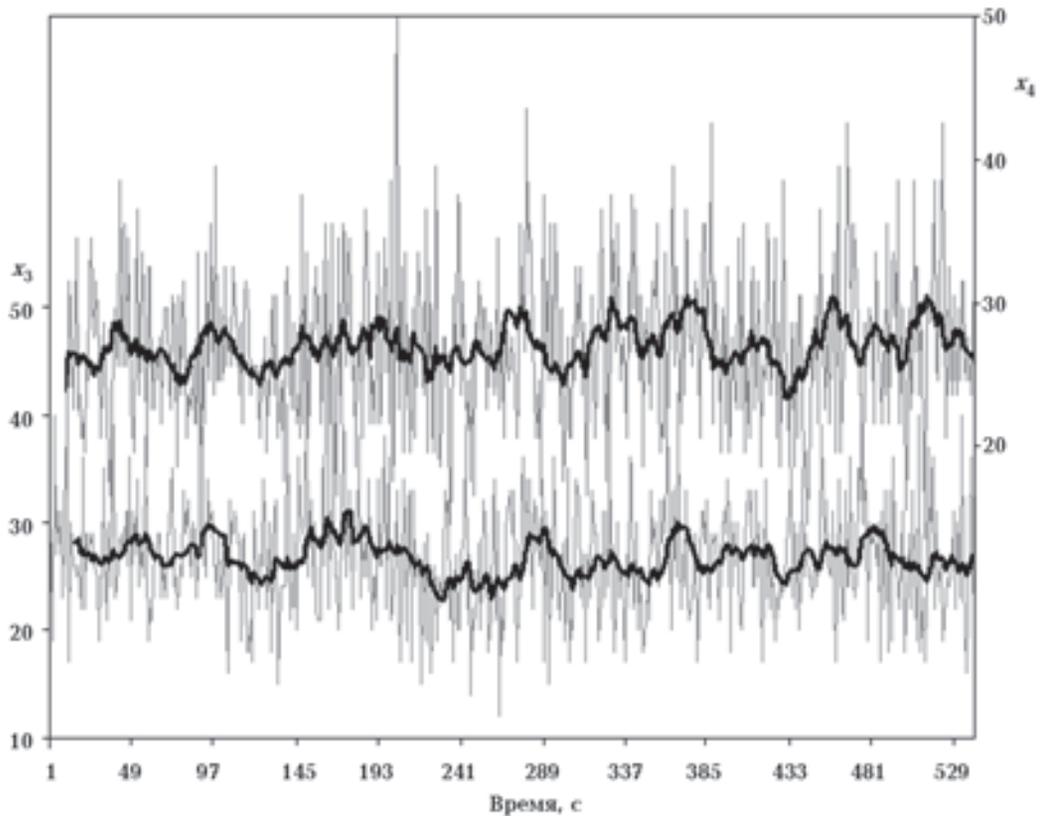


Рис. 4. Сопоставление показаний прибора по каналу X двух серий измерений по подземному профилю.

разрезов, отражающих в виде цвета разной насыщенности распределение в разрезе неоднородности интенсивности потока либо в виде графиков изменения интенсивности потока с глубиной. Разрезы строились как по наземным, так и по подземным данным.

По данным наземных измерений уверенно выделяются наклон геологических горизонтов (примерно $3\text{--}5^\circ$), а также кровля Славянской свиты в виде характерного для этого случая скачка излучения. Горизонты слабоизогнутые в виде асимметричных складок. Характер нарушений на границах складок (разрывные, пликативные) установить не удалось ввиду их слабой выраженности. Внутри Славянской свиты выделены все основные продуктивные соляные горизонты, включая Карфагенскую свиту (без разделения на отдельные маломощные пласты). В целом, по полученным наземным данным, выполненным со средним шагом 1,4 м, могут быть выделены горизонты мощностью около 8—10 м и более.

По данным измерений в штольне получен разрез подсолевой толщи. Наклон горизонтов незначительный, имеются изменения этого на-

клона в виде слабоамплитудных складок. Одна из наиболее «ярких» границ в виде скачка излучения, хорошо выраженного по всей длине профиля, соответствует границе Славянской и Никитовской свит, которой, как указывалось, соответствует также резкая смена залегающих пород.

Судя по признакам, характерным для водоносных горизонтов, их положение на разрезе также соответствует фактическому.

Выделяются горизонты мощностью около 10—12 м. Некоторое снижение разрешающей способности подземных данных по сравнению с наземными может быть обусловлено предварительным сглаживанием исходных данных.

Учитывая достаточно высокую однородность в строении территории, рассмотрим более подробно изменения интенсивности потока импульсов с глубиной в точке пересечения наземного и подземного профилей (рис. 5). Так как глубинное строение территории проводится на основе анализа пространственных аномалий излучения, для обоих профилей глубина исследования определяется их длиной.

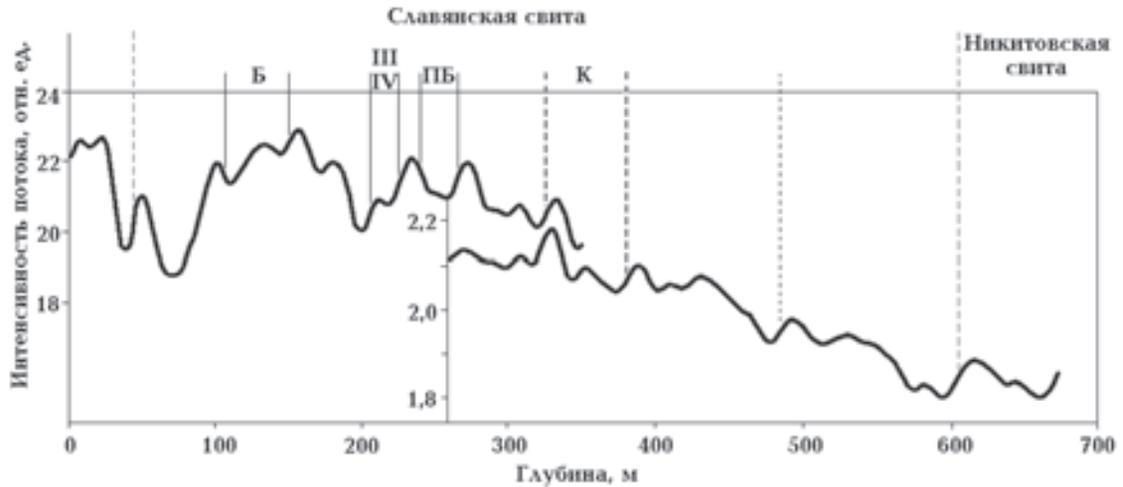


Рис. 5. Изменение интенсивности потока с глубиной по наземным и подземным данным. Соляные пласты: Б — Брянцевский, ПБ — Подбрянцевский, К — Карфагенские.

Прежде всего, следует отметить достаточно высокое сходство кривых по наземной и подземной съемкам на перекрывающихся глубинах, что указывает на объективность полученных результатов. Отчетливо выделяются скачки излучения, которые могут быть связаны с кровлей и подошвой Славянской свиты (показаны пунктиром), а также подсвиты в нижней части Славянской свиты (мелкий пунктир). Выраженный минимум излучения на глубине до 100 м вблизи кровли Славянской свиты, скорее всего, соответствует водоносной толще, формирующейся за счет проникновения грунтовых вод.

Выделение соляных пластов связано с определенными трудностями, поскольку измерения выполнены в пределах шахтного поля, где ранее проводилась интенсивная добыча соли, и соответственно присутствуют многочисленные камеры и межкамерные целики (промежутки), где выемка соли не производилась. Очевидно, камере должен соответствовать минимум излучения, а пласту в естественном залегании — как правило, максимум вблизи кровли пласта (аналогично, как и для кровли свиты). Для целика можно допустить перераспределение напряжений после выемки соли в соседних камерах [Пырин, Ярембаш, 2006], но соответствующих данных у нас нет. Авторы статьи не располагают также схемой шахтного поля, поэтому приведенные границы соляных пластов являются ориентировочными.

Наиболее мощные пласты соли, находящиеся в промышленной разработке (Брянцевский, Подбрянцевский), выделены по локальному минимуму, который, однако, приходится на повышенный уровень излучения. Это может быть

связано как с появлением зон повышенных напряжений (соответственно, зон повышенного излучения) вокруг камер, так и литологическими особенностями расположенных рядом пластов. Для пачек тонких пластов соли (III, IV, Карфагенские) за верхнюю границу пачки принят скачок интенсивности излучения.

Следует также отметить постепенное уменьшение интенсивности импульсного потока с глубиной.

Обсуждение результатов. Как известно, идеи о самоорганизации и образовании диссипативных структур в открытых нелинейных системах (геосреде) оказались очень важными с точки зрения того, чтобы перебросить мост между физикой, геофизикой и геологией. В частности, для описания и понимания свойств и механизмов генерации и распространения сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии литосферы как естественного явления, не требующего специфических условий для своего возникновения, определяющее значение имеет флуктуационно-диссипативная теорема статистической физики. Ее смысл состоит в том, что механизм любой диссипации является одновременно и механизмом рождения флуктуаций. За счет этого баланса флуктуации в системе (геосреде) никогда не исчезают, а поддерживаются на уровне, диктуемом ее дискретностью.

В широком смысле наблюдаемые вариации геофизических полей могут интерпретироваться в качестве проявления динамического хаоса в иерархически структурированной (фрактальной) среде. Как уже упоминалось, это универсальный эффект, не требующий специальных условий образования, если есть

поток тепла из земных недр, обусловленный также и восходящей диффузией легких газов (флюидов). В последние годы и микросейсмическому, и электромагнитному шуму уделяется пристальное внимание как с точки зрения особенностей его генерации и распространения, так и для получения информации о геосреде, ее строении, условиях деформирования, состоянии локальных областей земной коры.

Что же дает выполненный авторами настоящей статьи эксперимент для понимания этой проблемы? Высокая повторяемость результатов независимых серий подземных измерений по одной и той же линии профиля, отражение в полученных данных основных черт геологического строения территории убедительно свидетельствуют о литосферном происхождении регистрируемого излучения, которое при измерениях на земной поверхности составляет его меньшую часть.

Серьезным подтверждением неслучайности изменений интенсивности потока импульсов по профилю является высокое сходство результатов съемки в независимых сериях измерений, которого часто сложно добиться в наземных измерениях из-за временных вариаций внелитосферного излучения.

Принципиальным представляется результат диагностики разреза по наземным данным вплоть до глубины 350 м, а из сравнения одновременных наземных и подземных измерений следует, что атмосферно-ионосферная составляющая килогерцового диапазона отсутствует уже на глубине 260 м. Это непосредственно указывает на то, что излучение литосферы имеет иные свойства, иные законы распределения и распространения, которые не соответствуют парадигме классической электродинамики континуальных сред. Заметим, что измерение числа импульсов имеет известное преимущество перед измерением интенсивности (огигающей) сигнала, поскольку такой подход чувствителен к изменению количества излучателей в исследуемом разрезе. Однако он налагает и определенные ограничения на возможности диагностики структуры геосреды, тем не менее, неприменимость классической теории скин-эффекта для объяснения полученных результатов представляется достаточно очевидной.

Заметим, что при излучении волн фрактальными структурами особенности возникают уже в простейшем случае ансамбля независимых излучателей с фрактальным расположением в пространстве. Суть дела в необычной зависимости интенсивности излучения фрак-

тальных структур от расстояния. Другая его сторона — это флуктуации излучения фрактальных структур. Еще раз обратим внимание на шумоподобный характер излучения. Не секрет, что при проведении измерений различного рода полученный сигнал стараются очистить от шумов (помех). В данном случае очевидно, что прямые попытки очистить суммарный сигнал, регистрируемый на поверхности, от шумов может сопровождаться снижением или даже полным исключением из него полезного литосферного сигнала. Следовательно, корректное выделение литосферного сигнала из суммарного, регистрируемого на земной поверхности, станет возможным только после детального изучения свойств излучения, прежде всего, характерного для него статистического закона распределения.

В настоящее время пока это не сделано. Поэтому целесообразно проводить анализ излучения (характеристик его пространственных аномалий) без разделения сигналов от разных источников: в силу того, что только литосферный сигнал имеет связь с геологическим строением территории с характерным для него распределением напряжений, систем трещин и, как следствие, локальных излучателей. Однако для детальной съемки могут понадобиться двух- и трехкратные измерения по одному и тому же профилю, которые позволят снизить роль временных вариаций излучения в суммарном сигнале.

Заключение. Как свидетельствует эксперимент, спонтанная электромагнитная эмиссия, зарегистрированная в соляной шахте на глубине 260 м, генерируется исключительно литосферными источниками. Она практически не зашумлена источниками внелитосферного происхождения, как при ее регистрации на земной поверхности. Отмечается высокое сходство ее пространственного распределения вдоль подземного профиля в независимых сериях измерений.

По результатам наземных и подземных измерений построен единый геолого-геофизический разрез. При этом в интервале глубин, общем для наземных и подземных измерений, изменения интенсивности потока импульсов с глубиной (в относительных единицах) согласуются между собой.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству «Артемсоль» за предоставленную возможность проведения эксперимента, а также сотрудникам «Юг-нефтегазгеология» за проведение измерений.

Список литературы

- Антипова А. С. Месторождения каменной соли и рассолов Бахмутской котловины. Труды Украинского НИИ соляной промышленности. Вып. 4. Ч. 1: Соляные месторождения УССР. Москва: Гос. научн.-техн. изд-во по горному делу, 1962. С. 70—85.
- Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 4. С. 20—33.
- Гульельми А. В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли. *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. № 12. С. 1257—1276.
- Гуфельд И. В. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: МО ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Дьяконов Б. П., Троянов А. К. Голоса подземных недр. *Наука в России.* 1998. № 3. С. 10—14.
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ОИФЗ РАН, 1995. 36 с.
- Пырин С. Н. К проблеме комплексной обработки Артемовского месторождения каменной соли. *Наук. праці Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія «Гірничо-геологічна».* 2003. Вип. 63. С. 84—90.
- Пырин С. Н., Ярембаш И. Ф. Расчет параметров ярусной системы разработки в условиях Артемовского месторождения каменной соли. *Наук. праці Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія «Гірничо-геологічна».* 2006. Вип. 111. С. 10—13.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Коболев В. П., Русаков О. М., Орлюк М. И., Шуман В. Н., Омельченко В. Д., Пашкевич И. К., Толкунов А. П., Богданов Ю. А., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Федотова И. Н., Захаров И. Г., Черняков А. М., Курпrienko П. Я., Макаренко И. Б., Легостаева О. В., Лебедь Т. В., Савченко А. С. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 4. С. 44—68.
- Стратиграфічний кодекс України. Київ: Нац. стратиграф. комітет України, 1997. 39 с.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. Москва: Изд. Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. 235 с.
- Шуман В. Н. Геосреда и сейсмический процесс: проблемы управления. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 2. С. 16—27.
- Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы. *Геофиз. журн.* 2010а. Т. 32. № 6. С. 101—118.
- Шуман В. Н. Электродинамика геосреды и методы геоэлектрики. *Геофиз. журн.* 2010б. Т. 32. № 2. С. 28—42.
- Шуман В. Н. Электродинамика фрактальных сред, переходное фрактальное рассеяние и электромагнитный шум литосферы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 1. С. 3—13.
- Шуман В. Н., Коболев В. П., Богданов Ю. А., Захаров И. Г., Яцюта Д. А. Спонтанное электромагнитное излучение на акваториях: новый эксперимент и приложения. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 4. С. 33—49.
- Шуман В. Н., Коболев В. П., Старостенко В. И., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Захаров И. Г., Яцюта Д. А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, полевой эксперимент, элементы теории. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 40—61.
- Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* (Ed. M. Hayakawa), 1999. Tokyo: Terra Sci. Publ. Company, 996 p.
- Gershenson N., Bambakidis G., 2001. Modeling of seismic-electromagnetic phenomena. *Russian J. Earth Sci.* 3(4), 247—275.
- Surkov V. V., Tanaka H., 2005. Electrokinetic effect in fractal pore media as seismoelectric phenomena. In: *Fractal Behaviors of the Earth system* (Ed. V. P. Dimiri). New York: Haidelberg, P. 83—96.
- Surkov V. V. Hayakawa M., 2006. ULF geomagnetic perturbations due to seismic noise produced by rock fracture and crack formation treated as a stochastic process. *Phys. Chem. Earth* 31 (is. 4-9), 273—280.

On registration of spontaneous electromagnetic emission of lithosphere within lengthy salt adit

© I. G. Zakharov, V. N. Shuman, 2014

Results of measurements of impulse current of electromagnetic emission within frequency range 2,5—50kHz (by 3 dB level) in rectilinear horizontal part of natural salt 700 m long adit situated at the depth of 260m and without any technical sources of noise have been presented. Registration of impulse current of emission at the site of observation located at the surface above the adit was being conducted synchronously and by the instrument of the same type. In addition non-synchronous measurements of impulse current along the profile situated on the surface under acute angle to the course of the adit have been carried out. The component of spontaneous electromagnetic emission of lithosphere origin has been distinguished in the frequency range under consideration without noise bar from the sources of atmosphere-ionosphere-magnetosphere origin. Comparative analysis of impulse current records obtained at the day surface and in the adit with the depth exceeding the thickness of the skin-layer within the frequency ranges 2,5—50 kHz has been given and their geological-geophysical interpretation has been proposed.

Key words: spontaneous electromagnetic emission, active dissipative systems, geological and geophysical interpretation, the crustal sources of radiation.

References

- Antipova A. S., 1962. Deposits of rock salt and brine Bahmutstkoy basin. Proceedings of the Ukrainian Research Institute of the salt industry. Is. 4. Part 1: Salt deposits of the USSR. Moscow: State Scientific and Technical. Publ of Mining, P. 70—85 (in Russian).
- Bogdanov Ju. A., Pavlovich V. N., Shuman V. N., 2009. Spontaneous emission of electromagnetic lithosphere: state of the problem and mathematical models. *Geofizicheskij zhurnal* 31(4), 20—33 (in Russian).
- Gul'el'mi A. V., 2007. Ultra-waves in the crust and in the Earth's magnetosphere. *Uspehi fizicheskikh nauk* 177 (12), 1257—1276 (in Russian).
- Gufel'd I. V., 2007. Seismic process. Physico-chemical aspects. Korolev, 160 p. (in Russian).
- D'jakonov B. P., Trojanov A. K., 1998. Voices of subsurface resources. *Nauka v Rossii* (3), 10—14 (in Russian).
- Levshenko V. T., 1995. Ultra-low frequency electromagnetic signals lithospheric origin: Dr. phys.-mat. sci. diss. Moscow: JIPE RAS Publ., 36 p. (in Russian).
- Pyrin S. N., 2003. On the problem of complex Artemovskiy mining rock salt deposits. *Proceedings of Donetsk National Technical. University. A series of «Mining and Geology»*, is. 63, 84—90 (in Russian).
- Pyrin S. N., Jarembash I. F., 2006. Calculation of parameters tiered system under development Artemovskiy rock salt deposits. *Proceedings of Donetsk National Technical. University. A series of «Mining and Geology»*, is. 111, 10—13 (in Russian).
- Starostenko V. I., Lukin A. E., Kobolev V. P., Rusakov O. M., Orljuk M. I., Shuman V. N., Omel'chenko V. D., Pashkevich I. K., Tolkunov A. P., Bogdanov Ju. A., Burkin-skij I. B., Lojko N. P., Fedotova I. N., Zaharov I. G., Chernjakov A. M., Kuprienko P. Ja., Makarenko I. B., Legostaeva O. V., Lebed' T. V., Savchenko A. S., 2009. Model of the deep structure of the folded structure of Donetsk and the surrounding structures according to regional geophysical observations. *Geofizicheskij zhurnal* 31(4), 44—68 (in Russian).
- Stratigraphic Code of Ukraine, 1997. Kyiv: National Stratigraphic Committee of Ukraine Publ., 39 p. (in Ukrainian), 7,5
- Surkov V. V., 2000. Electromagnetic effects by earthquakes and explosions. Moscow: Moscow: Engineering Physics Inst. Publ., 235 p. (in Russian).
- Shuman V. N., 2011. Geological environment and the seismic process: management problems. *Geofizicheskij zhurnal* 33(2), 16—27 (in Russian).
- Shuman V. N., 2010a. The concept of dynamically unstable geomedium seismoelectromagnetic noise and the lithosphere. *Geofizicheskij zhurnal* 32(6), 101—118 (in Russian).
- Shuman V. N., 2010b. Electrodynamics geomedium and the geoelectric methods. *Geofizicheskij zhurnal* 32(2), 28—42 (in Russian).
- Shuman V. N., 2012. Electrodynamics fractal environments transitional fractal scattering and the electromagnetic noise of the lithosphere. *Geofizicheskij zhurnal* 34(1), 3—13 (in Russian).
- Shuman V. N., Kobolev V. P., Bogdanov Ju. A., Zaharov I. G., Yacjuta D. A., 2011. Spontaneous electro-

- magnetic radiation in the waters: a new experiment and applications. *Geofizicheskij zhurnal* 33(4), 33—49 (in Russian).
- Shuman V. N., Kobolev V. P., Starostenko V. I., Burkin-skij I. B., Lojko N. P., Zaharov I. G., Yacjuta D. A., 2012. Method of analysis of spontaneous electromagnetic emission of the Earth: physical prerequisites, field experiment, elements of the theory. *Geofizicheskij zhurnal* 34(4), 40—61 (in Russian).
- Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* (Ed. M. Hayakawa), 1999. Tokyo: Terra Sci. Publ. Company, 996 p.
- Gershenson N., Bambakidis G., 2001. Modeling of seismic-electromagnetic phenomena. *Russian J. Earth Sci.* 3(4), 247—275.
- Surkov V. V., Tanaka H., 2005. Electrokinetic effect in fractal pore media as seismoelectric phenomena. In: *Fractal Behaviors of the Earth system* (Ed. V. P. Dimiri). New York: Heidelberg, P. 83—96.
- Surkov V. V., Hayakawa M., 2006. ULF geomagnetic perturbations due to seismic noise produced by rock fracture and crack formation treated as a stochastic process. *Phys. Chem. Earth* 31 (is. 4-9), 273—280.