

Светов Б. С., Агеев В. В., Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, г. Москва

Последние несколько лет в ЦГЭМИ ИФЗ РАН ведутся активные работы по развитию сейсмоэлектрического (СЭ) метода геофизики, основанного на эффекте второго рода - частичному преобразованию энергии упругого поля в горных породах в электромагнитное (ЭМ). Наиболее распространенным механизмом таких механо-электрических преобразований, присутствующим практически любой горной породе является обратный электроосмос. Под действием сейсмического поля в пористой водосодержащей горной породе возникает относительное движение жидкости и твердого скелета породы. Поскольку вода в породе всегда содержит ионы растворенных солей, то в силу избирательной ионной адсорбции на границе твердой и жидкой фаз жидкость и скелет породы оказываются противоположно заряженными, и их относительное движение приводит к возникновению стороннего электрического тока. Этот сторонний ток порождает ЭМ поле. Наблюдение и интерпретация этого явления может дать геофизику сведения о пористости и проницаемости горных пород, о типе и содержании в ней флюида, о его минерализации. Эти сведения особенно ценны в нефтепромысловой, гидрогеологической и экологической геофизике (в ее полевом и каротажном вариантах).

К настоящему времени, в основном, разработана математическая теория, достаточно адекватно описывающая СЭ эффект 2-го рода в пористой флюидосодержащей среде, и проводятся полевые экспериментальные СЭ исследования. Их целью является: 1) выяснение возможности практической регистрации ЭМ полей, возбуждаемых упругими колебаниями в геологической среде; 2) экспериментальное подтверждение выводов, следующих из разработанной теории СЭ эффекта 2-го рода; 3) разработка основных принципов методики полевых СЭ работ. Для проведения полевых СЭ исследований была сконструирована 24-канальная СЭ станция с одновременной регистрацией 12 сейсмических и 12 электрических каналов. Электрические каналы отличаются гальванической развязкой. Частота опроса каждого канала - 5000 Гц (один дискрет по времени равен 200 мкс). В аппаратуре используются 24-х разрядные АЦП. Предусмотрено поканальное программное задание коэффициентов усиления. Синхронизация записи с моментом удара осуществляется по радиоканалу на удаление не менее 200 м. Моментом удара является касание кувалды (один контакт) и земли или металлической подставки (второй контакт). Ввод данных в компьютер происходит после каждого удара через параллельный порт. От выбираемой длительности записи (от 0,5 до 4с) зависит время передачи данных в компьютер, которое может достигать 10 с. Регистрация следующих ударов невозможна до звукового сигнала, показывающего, что ввод данных в компьютер закончен. В измерителе предусмотрена

программно переключаемая фильтрация (по уровню -3дБ): ФНЧ-90, 180, 360, 720 Гц; ФВЧ - 5, 10, 20 Гц. - и программно отключаемые режекторные фильтры с подавлением не менее, чем на 50 дБ - 50, 100, 150, 200 Гц. Однако использование режекторной фильтрации промышленных частот искажает регистрируемый полезный сигнал, так как эти частоты очень близки к основным частотам полезного сигнала. Гораздо эффективнее оказалось регистрировать фоновую помеху в течении 1-2 с до удара, определять по этим данным амплитуду и фазу промышленной помехи и ее гармоник, и считая эту помеху стационарной хотя бы в течение следующих нескольких секунд вычитать из рабочей записи. При этом полезный сигнал не искажается, а промышленную помеху с гармониками удается подавить в 10-30 раз. Таким образом, алгоритм работы измерителя следующий. В буферной памяти измерителя все время содержатся обновляемые данные фонового поля по всем каналам. В момент прихода синхроимпульса происходит выборка фоновых данных заданной длительности непосредственно перед ударом и вместе с рабочей записью этот массив передается в компьютер. Дальнейшее подавление помех достигается накоплением необходимого количества ударов.

Детальные полевые СЭ исследования были начаты на геофизическом полигоне МГУ в Калужской области (пойма реки Угра).

На первом этапе экспериментальных работ были проведены специальные исследования, направленные на выбор параметров измерительной установки, технологии возбуждения упругих колебаний и СЭ измерений и на изучение помехоустойчивости измерительного тракта и влияния на результаты измерений колебаний электродов в сейсмическом поле. Результаты этих базовых экспериментов приведены в работе [1]. В дальнейшем прием сейсмических сигналов осуществлялся сейсмоприемниками GS-20DX с полосой пропускания до 250 Гц. Для регистрации электрических сигналов использовались заземленные линии МН длиной 1-2 м со свинцовыми электродами. Процесс измерения на каждой точке заключается в расстановке 12-канальной СЭ косы (сейсмоприемники расположены в центре приемных диполей МН) с шагом между каналами 2 - 5 м. Точка удара располагается на таком же расстоянии (2-5 м) от крайнего электрода. От одной точки возбуждения на 12 каналах регистрируется часть СЭ годографа. Если есть необходимость в величинах электрического сигнала позволяют увеличить длину годографа, то пункт возбуждения переносится на длину косы и производится второй цикл ударов и их накопления. В Калужской области максимальные разности установки, при которой еще можно было получить качественные измерения электрического поля, составляли 80 м. При этом измеряемое электрическое поле

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

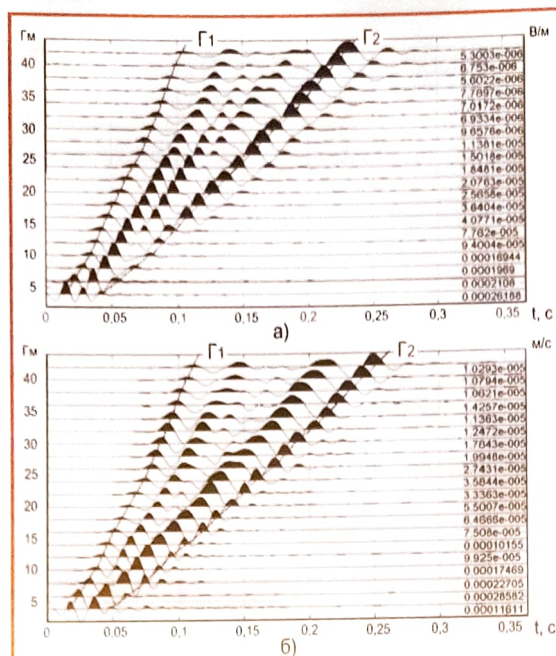


Рис. 1. Сейсмограммы и электрограммы, зарегистрированные в одной из точек экспериментального профиля.

менялось от 200 мВ/м на первых метрах установки до единиц мкВ/м на удалении 40-50 м. На рис. 1 приведен пример зарегистрированных в одной из точек профиля сейсмограммы вертикальной составляющей упругого поля (а) и электрограммы, ориентированной по профилю горизонтальной составляющей электрического поля (б). По горизонтальной оси графиков отложено время t в секундах, отсчитываемое от момента удара. Отдельные трассы сигналов индексированы расстоянием до пункта удара в метрах. Приведены результаты измерений на разносах от 4 до 42 м. В правой части всех графиков выписаны максимальные значения сейсмических или электрических сигналов (соответственно в м/с или в В/м), определяющие вертикальные масштабы на каждой из сигнальных трасс. На этом пикете, на расстоянии 44 м, максимальный сигнал по электрическому полю составлял 5.3 мкВ/м. Из рисунка следует вывод о сложном характере сейсмического (а значит и электрического) поля, свойственном сложно построенной приповерхностной толще геологических разрезов. На малых временах регистрируются рефрагированные волны (ось синфазности G_1), возникновение которых связано с постепенным увеличением с глубиной скорости сейсмических волн в такого рода разрезах, а на больших - интенсивные низкочастотные поверхностные волны (ось синфазности G_2). Промежуточные времена заполнены интерферирующими между собой волнами различного типа. Скорости распространения выделяемых сейсмических волн (V) низкие, у поверхностных волн их величина не превышает 200-300 м/с, а у рефрагированных волн она возрастает с увеличением разноса от 400-500 м/с (на разносах $r \approx 3-4$ м) до 800-1000 м/с (на разносах $r \approx 30-40$ м). Электрические «волны» (точнее - сигналы) достаточно хорошо коррелируются с сейсмическими волнами, что свидетельствует об их вмороженности в упругое поле и, как правило, их

опережают, причем это опережение значительно превышает эффект, связанный с конечной длиной приемных электрических линий. На больших временах корреляция становится затруднительной из-за неодинаковой интерференции упругих и электрических волн и более низкого отношения сигнал/помеха.

Аналогичные эксперименты были поставлены и в других регионах, отличающихся по геологии - Кольском полуострове, в Татарии, в Саратовской области. В этих местах интенсивность электрического поля была в несколько раз меньше. Поэтому максимально достижимыми разносами были 10-20 м при накоплении 20-40 ударов и последующей изощренной обработки сигналов для подавления промышленных помех.

Основным интерпретационным параметром является СЭ передаточная функция $W=E/V$ (В·с/м²), представляющая собой отношение регистрируемых в одной и той же точке напряженности электрического поля и скорости механического смещения, которую можно получать на каждом разносе для разных типов вмороженных волн.

Следующим важным этапом СЭ исследований стали измерения, выполненные над различными геологическими неоднородностями с целью выявления зависимостей СЭ полей от различных геологических, петрофизических и других факторов. Один из таких примеров приведен в нашей работе [1]. В результате обработки измеренных данных было изучено поведение СЭ передаточной функции $W=E/V$ (В·с/м²) по профилю. Передаточная функция закономерно изменяется по профилю в соответствии с геологическими и геофизическими данными. В частности, на разрезе, полученном по данным ЗСБ, уверенно выделяется слой глин на глубине 20 м, являющийся водоупором. Этот слой прерывается врезом палеодолины. Затем глинистый слой появляется снова. Удельное сопротивление верхней части разреза возрастает справа налево от 50 до 500 Ом·м. Этот рост объясняет увеличение передаточной СЭ функции вплоть до края палеодолины. Далее происходит ее резкое падение, хотя удельное сопротивление продолжает возрастать. Это связано с тем, что в месте размыва глинистого водоупора резко меняются гидрогеологические условия. Фактор уменьшения влажности становится определяющим и более значимым для сейсмoeлектрики по сравнению с фактором роста удельного сопротивления. Все это говорит о том, что СЭ измерения несут независимую содержательную информацию.

Было также установлено закономерное существенное ослабление СЭ эффекта по мере приближения к реке. Так, по одному из профилей приближение к пойме реки Угра СЭ уменьшает W в 30 раз по сравнению с фоновыми значениями. Если рассматривать зависимость СЭ эффекта от удельной поверхности порового пространства, а не от общей пористости, то в случае хорошо промытых прибрежных песков их пористость будет велика, а удельная поверхность порового пространства, которая обуславливает СЭ эффект, мала, что согласуется с полевыми данными. Можно отметить еще одну локальную аномальную область, которая характерна тем, что выделяется только на разносах 24 м и более, а на малых разносах никак не проявляется.

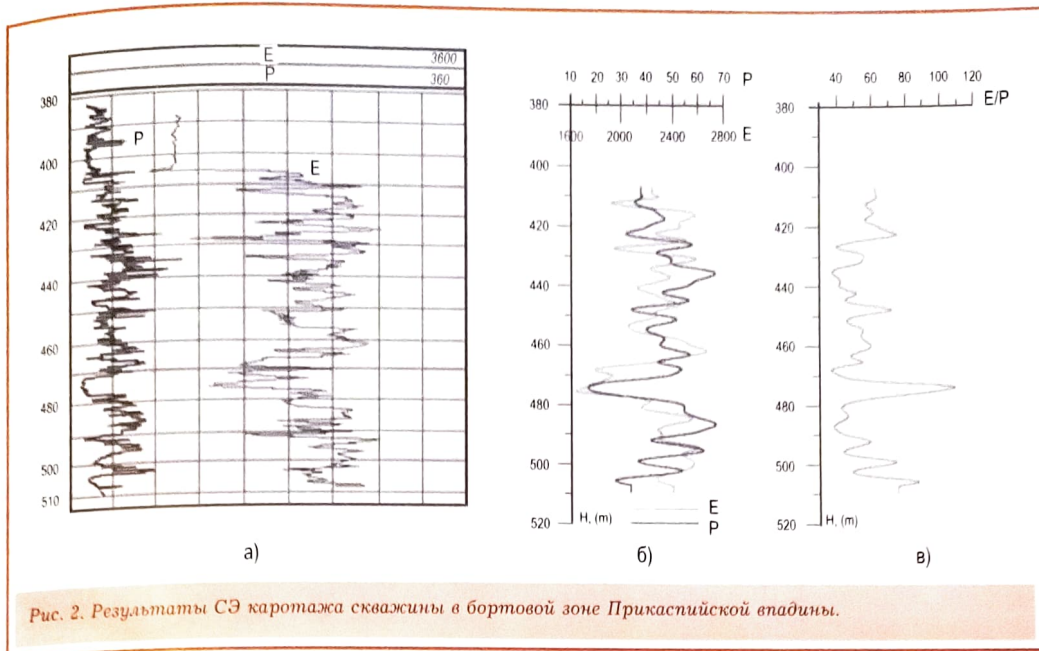


Рис. 2. Результаты СЭ каротажа скважины в бортовой зоне Прикаспийской впадины.

Пространственно к этому месту приурочен край слоя глины на глубине порядка 20 м, образованный врезом палеодолины. Такая привязка к аномалеобразующему объекту на глубине 20 м позволяет надеяться на то, что глубинность СЭ исследований достаточно большая и не определяется только поверхностным слоем.

Другой экспериментальный участок характеризовался двумя заметными неоднородностями, с которыми можно было коррелировать наблюдаемые СЭ эффекты. Одна представляла из себя песчано-гидратную линзу в первых 3-4 м разреза в моренных суглинках, вторая более глубокая неоднородность - врез в известняки на глубине 15-25 м, заполненный песчано-глинистыми моренными отложениями. Результатом эксперимента явились следующие закономерности: 1) такие характеристики сейсмического поля, как скорость прямой продольной волны и интенсивность первых наиболее значимых волн определяются поверхностной неоднородностью; 2) электрическое поле и СЭ передаточная функция практически не меняются при пересечении поверхностной песчаной линзы и закономерно возрастают в 4-5 раз вдоль профиля при погружении кровли известняков с 15 м до 25 м. В этом эксперименте важным является возможность качественно оценить глубинность наземных СЭ исследований. То, что маломощная поверхностная неоднородность не явилась определяющей для сейсмoeлектрики, а наблюдается уверенная связь с глубиной до известняков, подтверждает ранее сделанный вывод: глубинность реализованного варианта СЭ исследований составляет, по крайней мере, первые десятки метров. Наблюдаемый рост СЭ передаточной функции может быть, как и на первом участке, обусловлен увеличением поверхности порового пространства при переходе от песков к суглинкам.

Особые надежды на эффективность применения СЭ метода можно ожидать от скважинных исследований. На рис. 2 представлены результаты СЭ каротажа скважины [2], расположенной в бортовой зоне Прикаспийской впадины. Измерения проводились на фиксированной частоте 9,5 кГц, длина зонда 0,5 м. Возбуждение

упругого поля осуществлялось магнитострикционным излучателем. На рис. 2а показаны непосредственно зарегистрированные кривые давления и напряженности электрического поля. Сигнал по электрическому полю составляет сотни мкВ и многократно превышает уровень помех. В обсаженном металлической колонной интервале скважины (до глубины 410 м) он резко уменьшается. В открытом интервале акустическое Р и электрическое Е поля - дифференцированы и, в основном, коррелируются между собой. На рис. 2б изображены те же графики, усредненные низкочастотным фильтром шириной 5 м. Видно, что на отдельных интервалах корреляция акустического и электрического сигналов нарушается, что свидетельствует о том, что они дают независимую информацию. На рис. 2в приведены графики сейсмoeлектрической передаточной функции (отношение Е к Р), значения которой, как следует из теории и лабораторных экспериментов, пропорциональны пористости горных пород. Графики Е, Р и Е/Р, в целом, отражают особенности геологического разреза, известные по кернам и данным других каротажных методов. В частности, повышенные значения передаточной функции в интервале глубин 470-480 м приурочены к интервалам наиболее трещиноватых и кавернозных известняков. Этот интервал совпадает с областью пониженных значений кажущихся сопротивлений, полученных по данным электрического каротажа. Достоверность полученных результатов подтверждена многократными повторными измерениями.

Эти работы подтвердили, в основном, разработанную теорию СЭ явлений и перспективы применения сейсмoeлектрики при решении инженерных, гидрогеологических и рудных задач.

Литература

1. Светов Б. С., Агеев В. В., Александров П. Н. и др. Некоторые результаты экспериментальных полевых сейсмoeлектрических исследований // Геофизика, 2001, №6.
2. Б. С. Светов, В. В. Агеев, О. А. Агеева и др. Сейсмoeлектрические методы разведки и каротажа // Геофизика, 2004, №1.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ