

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.837.73

**О НАБЛЮДЕНИИ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ГАЗОКОНДЕНСАТНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМАХ ЗЕМЛИ В ДИАПАЗОНЕ 0.1—20.0 Гц**

**Г.Я. Шайдуров, Д.С. Кудинов, В.С. Потылицын, Р.Г. Шайдуров**

*Сибирский федеральный университет, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26, Россия*

На двух площадях Минусинского газоконденсатного месторождения (Хакассия) в 2014 и 2015 гг. с использованием разработанного в СФУ двухканального геофизического прибора ВРЕМПЗ-М1 (Шум-6), были поставлены первые опытные работы по измерению функции взаимной корреляции (ФВК) сейсмических и электрических шумов Земли, снимаемых одновременно с электрического диполя и сейсмоприемника в диапазоне частот 0.1—20.0 Гц. Продуктивная залежь на глубинах 1800—2000 м была в обоих случаях отмечена максимумом ВКФ, в 5—7 раз превышающим нормальный фон, что указывает на проявление сейсмоэлектрического эффекта в пассивных полях.

*Сейсмические шумы, электрические шумы, взаимно-корреляционная функция, газоконденсатное месторождение Минусинское.*

**OBSERVATION OF SEISMOELECTRIC EFFECT IN GAS CONDENSATE FIELD  
IN THE NATURAL EARTH'S ELECTROMAGNETIC AND SEISMIC NOISE OF 0.1–20 Hz**

**G.Y. Shaidurov, D.S. Kudinov, V.S. Potylitsyn, and R.G. Shaidurov**

The first experimental measurements of the cross-correlation function (CCF) of the Earth's seismic and electrical noise were carried out in two areas of the Minusinskoe gas condensate field in 2014 and 2015, using a VPEMPZ-M1 (Shum-6) two-channel geophysical device developed at Siberian Federal University. The Earth's seismic noise and electrical noise in the frequency range 0.1–20 Hz were received by a geophone and an electric dipole, respectively. In both cases, a productive pool at depths of 1800–2000 m had a maximum CCF value five to seven times greater than the normal background. This phenomenon indicates the occurrence of the seismo-electric effect in passive fields.

*Seismic noise, electrical noise, cross-correlation function, Minusinskoe gas condensate field.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Основными проблемами поиска и разведки углеводородов в Восточной Сибири является чрезвычайная неоднородность верхней части разреза, осложненного трапповыми включениями магматических пород, а также малая мощность продуктивных залежей (порядка 10 м), зачастую перекрытых солевыми отложениями.

В этих условиях традиционные методы сейсморазведки не дают однозначных результатов, т. к. велика вероятность пропуска. Из 10 дорогостоящих скважин лишь половина и менее подтверждаются выходом полезного продукта [Максимов и др., 2014].

Использование комплекса геофизических методов, безусловно, улучшает качество распознавания залежей нефти и газа. По этой причине привлечение новых физических параметров и удешевление постановки работ сегодня чрезвычайно актуально.

Одним из новых направлений идентификации продуктивных залежей является технология АН-ЧАР [Артюнов и др., 1999; Ведерников, 2009], основанная на регистрации сейсмических сигналов в течение достаточно большого времени (минуты и более) после воздействия на разрез взрывом или ударом невзрывных источников. В работах [Ведерников, 2012; Максимов и др., 2014] описана пассивно-

активная технология сейсморазведки, основанная на регистрации микросейсм с возбуждением ПАС МОГТ искусственным сейсмоисточником.

Классическим способом геокартирования признан магнитно-теллурический метод, заключающийся в наблюдении магнитных либо электрических компонентов теллурических токов в диапазоне инфранизких частот (0.01—10 000 Гц), дающий информацию об удельном сопротивлении среды в рамках двумерных и трехмерных моделей [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Еще одним электроразведочным способом, применяемым в разведке углеводородов, является метод вызванной поляризации (ВП), реализуемый регистрацией переходных характеристик электрических потенциалов при пропускании через разрез поляризующего тока от специальных источников [Veeken et al., 2009]. Метод традиционно используется при поиске полиметаллических руд. При этом появление потенциалов ВП объясняется разрядом двойного электрического слоя на границах раздела электронной (руда) и ионной проводимостей (окружающая горная порода, насыщенная водой).

Потенциалы ВП на границах залежей углеводородов, по-видимому, имеют другое происхождение, поскольку речь идет о границе раздела пористой породы насыщенной диэлектриком (углеводороды) в ионопроводящей среде. В этом случае на окружающую среду идет разряд электрической энергии, накопленной в диэлектрике. Новые возможности электроразведки при поиске углеводородов изложены в [Тригубович, Эпов, 2009].

Первая публикация по сейсмоэлектрическому методу сделана А.Г. Ивановым в 1940 г. [1940]. В последние годы появилось достаточно много работ по этому направлению и, в частности, по использованию сейсмоэлектрических явлений при поиске углеводородов [Потапов и др., 1995; Агеева, 2008]. В [Сибгатулин и др., 2016] изложены результаты наблюдений влияния гравитационных приливов на появление сейсмических резонансных частот в диапазоне 0.1—5.0 Гц над нефтегазовыми месторождениями.

Патентом США [Berg, 2005] был предложен метод сейсмоэлектроразведки, заключающийся в одновременном воздействии на георазрез сейсмического удара и электрического поля от мощных искусственных источников. Совместная обработка сигналов, указывающих на наличие и размер продуктивного пласта, с учетом разницы во времени их поступления на приемники позволяет выделить переходную характеристику вторичного электрического поля. Этот метод применялся в достаточно больших масштабах на морских акваториях северных морей России и в Мексиканском заливе [Мельников и др., 2011а] с использованием буксируемых за судном-носителем электрических питающих и приемных линий, и импульсных сейсмических излучателей. По этим данным вероятность подтверждения наличия продуктивных пластов бурением возрастает в 4 раза по сравнению с традиционным прогнозом по данным сейсморазведки и другими методами.

Большим недостатком этой технологии, особенно в наземном варианте, является необходимость использования мощных источников «подсвечивающего» электрического поля, длинных питающих линий, а также разработки способов компенсации сигналов становления электрического поля от слоистой вмещающей среды георазреза, существенно понижающих чувствительность метода. В [Мельников и др., 2011а,б] сообщается, что аппаратный комплекс для постановки этого метода на суше использует несколько большегрузных автомобилей различного назначения — сейсмических и электрических источников возбуждающего поля, автомобили для транспортировки питающих кабелей, заземлений, сейсмостанции и т. п.

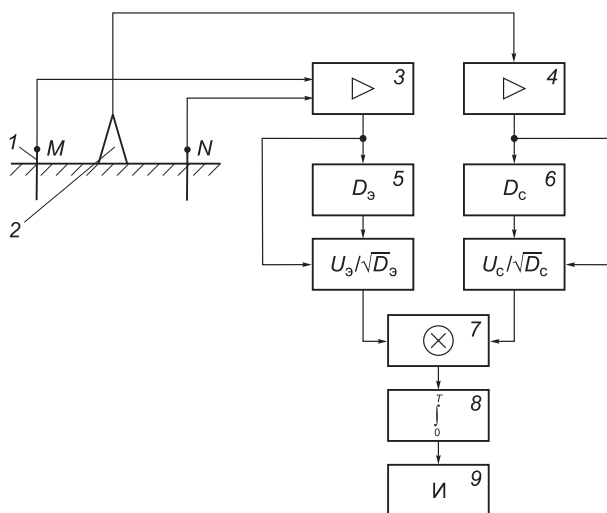
В работе [Шайдуров и др., 1991] описан алгоритм извлечения потенциалов ВП из естественного электромагнитного поля Земли путем регистрации совокупного фазового сдвига шумовых сигналов в диапазоне частот (0.1—20.0 Гц) с использованием градиентной установки, при одновременном приеме на две смежные электрические линии. Был разработан двухканальный макет прибора ВПЕМПЗ-М1, результаты испытания которого на железорудном месторождении изложены в [Шайдуров, Потылицын, 2012].

Этим же прибором отмечена аномалия ВП на Новомихайловской площади Минусинского газоконденсатного месторождения (Хакасия) в 2014 г. путем регистрации фазового сдвига между двумя шумовыми сигналами электрического поля, снимаемыми с двух смежных заземленных электрических диполей в диапазоне частот 0.1—20.0 Гц по методике, изложенной в [Шайдуров, Потылицын, 2012]. В июле-августе 2014—2015 г. на двух площадях указанного выше газоконденсатного месторождения, Новомихайловской (2014—2015 гг.) и Быстрянской (2015 г.), были проведены измерения по наблюдению сейсмоэлектрического эффекта, определяемого через коэффициент взаимной корреляции электрического  $E_E(t)$  и сейсмического  $E_s(t)$  шумовых сигналов, нормированных по дисперсии;

$$R_{ES}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \overline{E_E(t)} \cdot \overline{E_S(t - \tau)} dt. \quad (1)$$

**Рис. 1. Структурная схема макета прибора ВПЕМПЗ-М1 (Шум-6).**

1 — датчик (диполь) электрического поля; 2 — сейсмоприемник; 3, 4 — усилители; 5, 6 — устройство вычисления дисперсий; 7 — перемножитель; 8 — интегратор; 9 — индикатор.  $U_{э,с}$  — ЭДС полезного сигнала;  $D_{э,с}$  — электрическая и сейсмическая составляющие.



На рис. 1 приведена структурная схема макета прибора ВПЕМПЗ-М1, содержащего два предварительных усилителя, одинаковых по частотно-фазовым характеристикам, аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер, реализующий цифровым способом вышеприведенный алгоритм.

Быстрянская газовая площадь находится в 10 км севернее Минусинска, Новомихайловская площадь — 70 км к югу от Абакана (Хакасия). На Быстрянской площади газоконденсатная залежь находится на глубине 1800 м, общая площадь разведанного продуктивного участка 3×3 км<sup>2</sup>. В 1990—1999 гг. месторождение было хорошо изучено разведочными скважинами, сейсморазведочным и электроразведочными методами.

Время отсчета всех параметров  $T$  было одинаковым и составляло от 10 до 60 с, количество измерений на точке  $N = 10$ . Длина электрической приемной линии  $MN$  составляла 100 м. При наблюдении сейсмoeлектрического эффекта в центре линии  $MN$  длиной 100 м устанавливался сейсмоприемник. Для заземлений электрических линий использовались неполяризующиеся электроды.

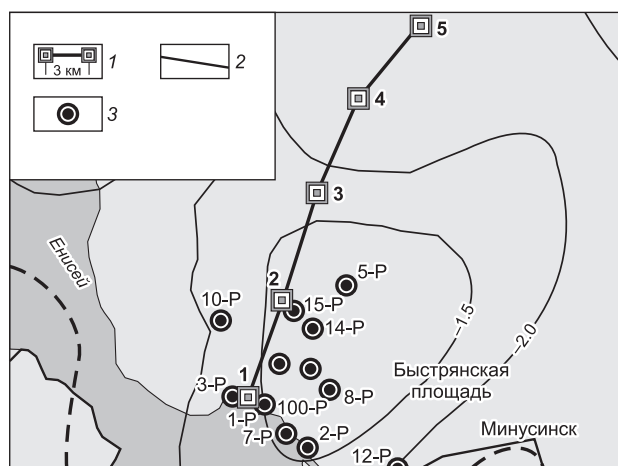
### БЫСТРЯНСКАЯ ПЛОЩАДЬ

Ниже изложены результаты апробирования этого макета прибора на Быстрянской площади (рис. 2, 3) с использованием электрического и сейсмического шумового поля.

Приведены данные с геологической карты Быстрянской площади (см. рис. 2). Началом профиля была выбрана скв. 1-Р. Она является первой точкой измерения по профилю. Цифрами обозначены точки наблюдения. Центр аномалии отмечен т. 2, второй точкой измерения являлась скв. 15-Р, на скв. 5-Р наблюдался «факел».

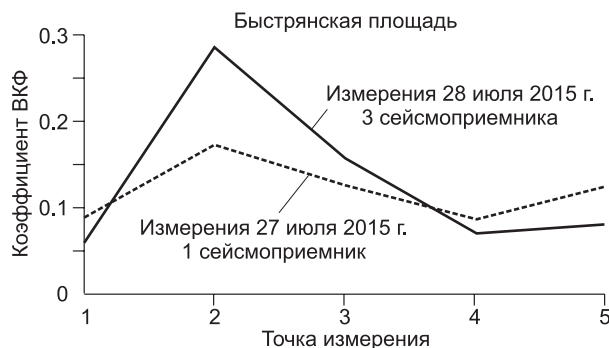
На рис. 3 изображен график усредненных значений максимума взаимно-корреляционной функции на различных точках наблюдения профиля в следующий день наблюдений, что связано с изменением уровня микросейсм по отношению к основному сигналу.

Типичные взаимно корреляционные функции, полученные на точках наблюдения 2 (а) и 4 (б), т. е. в аномальной точке над ее центром и на периферии, на расстоянии 12 км от центра аномалии приведены на рис. 4. Из этих графиков видно, что коэффициент взаимной корреляции в

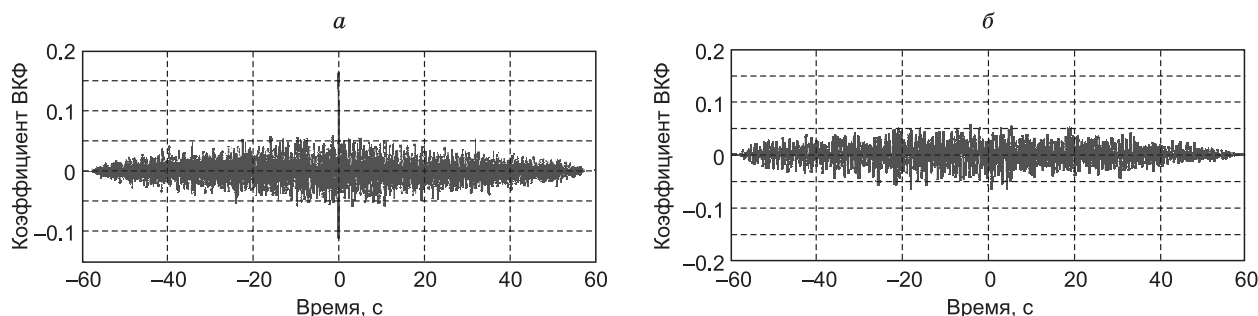


**Рис. 2. Геологическая карта Быстрянской газовой площади.**

1 — точки измерения, 2 — изогипсы поверхности бейской свиты и их значения (тыс. м.) по данным бурения и сейсморазведочных работ, 3 — скважины глубокого бурения.



**Рис. 3. Профильные характеристики коэффициентов взаимной корреляции, полученные на Быстрянской площади.**



**Рис. 4. Взаимно корреляционные функции, полученные на Быстрянской газовой площади:**

*a* — в центре аномалии (т. 2), *б* — на периферии аномалии (т. 4).

аномальной точке (*a*) в три раза превышает его значение в нормальной зоне (*б*), что указывает на появление сейсмоэлектрического эффекта над газовой залежью.

### НОВОМИХАЙЛОВСКАЯ ПЛОЩАДЬ

Данные с геологической карты Новомихайловской площади приведены на рис. 5. Началом профиля была выбрана скв. 1-Р, которая в свое время дала мощный «факел» и является первой точкой измерения на графике профилирования. Маркерами обозначены точки измерения.

На рис. 6 изображен график усредненных значений максимума взаимно корреляционной функции на различных точках наблюдения профиля, полученная в 2014 и повторным наблюдением в 2015 г. Как и рис. 3, это может свидетельствовать о независимости результата от времени года.

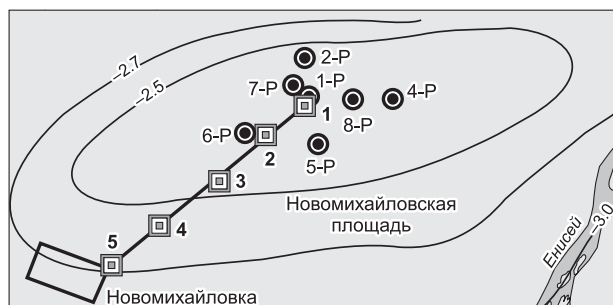
Типичные взаимно корреляционные функции, наблюдаемые на точках 1 (*a*) и 4 (*б*) приведены на рис. 7. На этой площади КВК над аномальной точкой (см. рис. 7, *a*) превышает нормальный фон в восемь раз (см. рис. 7, *б*), что еще раз подтверждает эффективность подобных наблюдений.

В работе Ведерникова [2012] представлены материалы экспериментальных наблюдений пассивных сейсмических шумов в диапазоне частот 2—100 Гц над углеводородными залежами, где показано, что над продуктивными пластами наблюдается повышенный уровень шума в 2—3 раза по сравнению с нормальным полем. Это объясняется сейсмической эмиссией шумов углеводородных месторождений, в ряде случаев имеющих резонансный характер с сосредоточиванием спектра мощности на определенных частотах. Делается вывод о возможности создания прямого метода поиска углеводородов.

Описанные выше материалы наших наблюдений функций взаимной корреляции сейсмических и электрических шумов над газоконденсатными залежами указывают на сопровождение сейсмической энергии электрическими шумовыми потенциалами, возможно, как следствие этой эмиссии.

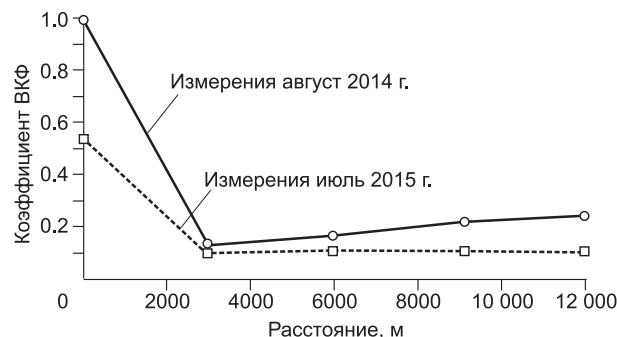
Поскольку скорость распространения электрических колебаний в Земле существенно выше, чем сейсмических, то на поверхности Земли те и другие должны наблюдаться с задержкой по времени. При скорости распространения продольных сейсмических волн 4 000 м/с эта задержка при средней глубине газоконденсатной залежи на Минусинском месторождении 2 000 м составит 0.5 с.

Программа работы микроконтроллера прибора Шум-6 позволяет автоматически запоминать в оперативной памяти прибора одновременно оба шума. При этом взаимно корреляционная функция по-

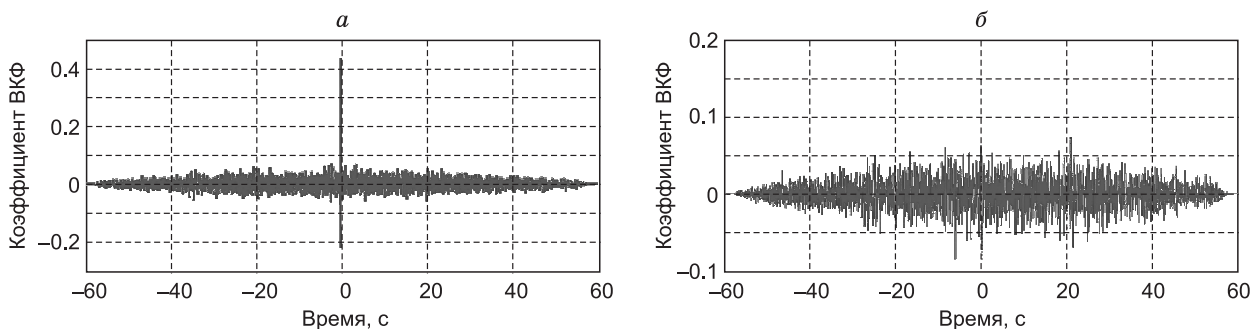


**Рис. 5. Геологическая карта Новомихайловской газовой площади.**

Усл. обозн. см. на рис. 2.



**Рис. 6. Профильные характеристики коэффициентов взаимной корреляции, полученные на Новомихайловской площади.**



**Рис. 7. Взаимно корреляционные функции, полученные на Новомихайловской газовой площади:**

*a* — в центре аномалии (т. 1); *б* — на периферии аномалии (т. 4).

лучается сверткой обоих шумов во времени в течение 60 с, так что максимум ФВК наблюдается в момент совпадения по времени и фазе сейсмического и электрического шумов. Таким образом, одновременное наблюдение обоих шумов расширяет пространство признаков распознавания углеводородов. В этом смысле технология АНЧАР, основанная на подсветке залежи искусственным сейсмическим излучением и наблюдением шумовой сейсмической эмиссии через какое-то время после искусственного возмущения, имеет существенный недостаток — пониженную чувствительность. Взаимно корреляционная обработка исключает этот недостаток. Ее возможно использовать и в методе АНЧАР.

#### ВЫВОДЫ

Пассивный сейсмоэлектрический (ПСЭ) метод основан на регистрации функции взаимной корреляции сейсмических и электрических шумов и дает надежду на существенное улучшение эффективности поисков и разведки углеводородов при реализации прямого метода поиска [Шайдунов и др., 2013].

Для практической реализации ПСЭ необходим большой объем полевых работ в разнообразных геолого-геофизических условиях, разработка теоретических основ метода, привлечение заинтересованных инвесторов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Агеева О.А.** Использование сейсмоэлектрических преобразований в породах для прогнозирования характера насыщения порового пространства // *Геофизика*, 2008, №1, с. 16—21.

**Арутюнов С.П., Давыдов В.Ф., Кузнецов О.Л., Графов Б.М., Сиротинский Ю.В.** Явление генерации инфразвуковых волн нефтегазовой залежью // *Научное открытие*, 1999, №109, 58 с.

**Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.** Модели и методы магнитотеллурики. М., Научный мир, 2009, 668 с.

**Ведерников Г.В.** Изучение микросейсм при сейсморазведочных работах МОГТ для прогнозирования залежей углеводородов // Тезисы доклада МПК (24—26 ноября 2008 г.) Новосибирск, СНИИГиМС, 2009, с. 48—53.

**Ведерников Г.В.** Прогноз залежей углеводородов по характеристикам микросейсм. Избранные статьи, Новосибирск, Изд-во «Свиныйн и сыновья», 2012, 194 с.

**Иванов А.Г.** Сейсмоэлектрический эффект второго рода // *Изв. АН СССР, серия географическая и геофизическая*, 1940, № 5, с. 18—21.

**Максимов Л.А., Ведерников Г.В., Яшков Г.Н.** Геодинамический шум залежей углеводородов и пассивно-активная сейсморазведка // *Журнал «НефтьГазЭкспозиция»* № 2, 2014, с. 55—57.

**Мельников В.П., Лисов В.И., Брюховецкий О.С., Бобровников Л.З.** Инновационная геофизика: бинарные технологии прямых поисков месторождений полезных ископаемых. Ч. 1 // *Инженер-нефтяник*, 2011 а, № 1, с. 47—51

**Мельников В.П., Лисов В.И., Брюховецкий О.С., Бобровников Л.З.** Инновационная геофизика: бинарные технологии прямых поисков месторождений полезных ископаемых. Ч. 2 // *Инженер-нефтяник*, 2011б, № 2, с. 12—14.

**Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф., Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф.** Основы сейсмоэлектроразведки. М., Недра, 1995, 268 с.

**Сибгатулин В.Г., Перетокин С.А., Кабанов А.А.** Резонансы гравитационных приливов — мощный энергетический источник геодинамических процессов в земной коре // Техника и технология. Сибирский федеральный университет, 2016, № 9 (2), с. 147—165.

**Тригубович Г.М., Эпов М.И.** Новые возможности электромагнитной разведки. Тезисы доклада научно-практической конференции (24—26 ноября 2008 г.), Новосибирск, СНИИГГиМС, 2009, с. 16—19.

**Шайдуров Г.Я., Козлов Ю.Н., Маркушин Я.В.** Дифференциальный метод извлечения информации о потенциалах ВП из естественного электромагнитного поля Земли // Геофизическая аппаратура. Л., Недра, 1991, с. 35—42.

**Шайдуров Г.Я., Потылицын В.С.** Некоторые результаты полевых испытаний метода вызванной поляризации на основе выделения информации из естественного электромагнитного поля Земли. Приборы и системы разведочной геофизики. ИнформГеофизСервис, 2012, № 4, с. 51—54.

**Шайдуров Г.Я., Кудинов Д.С., Потылицын В.С.** Способ поиска углеводородов. Патент РФ №2559046 РФ от 14.02.2013, заявл. № 2013106619/28, опублик. в БИ № 23, 10.08.2015.

**Berg A.** Method of Seismo-Electromagnetic Detecting of Hydrocarbon Deposit, US Patent № 7,330,790. October 2005.19.

**Veeken P.C.H., Legeydo P.J., Davidenko Y.A., Kudryavceva E., Ivanov S., Chuvaev A.** Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // Geophysics, № 2 (47), 2009, p. 47—59.

*Рекомендована к печати 20 сентября 2017 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
28 февраля 2017 г.*