

УДК 550.3

СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ – ОСНОВА НОВОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН – СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Чердынцев С.Н.

ООО «Оренбурггеопроект», Оренбург, e-mail: 89501818580@mail.ru

В статье рассматривается применение на нефтяных месторождениях Оренбургской области нового геофизического метода исследований скважин – сейсмоэлектрического каротажа, основанного на изучении и анализе сейсмоэлектрического эффекта, возникающего во флюидонасыщенных осадочных горных породах в результате их электризации при относительном смещении твердой и жидкой фаз под воздействием упругих волн. Приводится обзор литературных источников по исследованию сейсмоэлектрического эффекта в лабораторных, полевых и скважинных условиях. Описываются физические предпосылки, определяющие возможности применения нового геофизического метода исследования нефтяных скважин – сейсмоэлектрического каротажа для решения конкретных геологических, технических и научно-исследовательских задач. В основе метода сейсмоэлектрического каротажа лежит метод потенциалов собственной поляризации при одновременном акустическом воздействии на зону исследования и применении мегаэлектродного блока. Применение метода потенциалов собственной поляризации для выделения в карбонатном разрезе коллекторов и оценки характера их насыщенности представляет достаточно сложную задачу и вызывает определенные трудности в связи со слабой дифференцированностью и малой амплитудой каротажных диаграмм. За счет наложения акустического поля на зону исследования и применения мегаэлектродного блока при записи каротажных диаграмм значительно повышается информативность метода потенциалов собственной поляризации. Дается краткое описание комплекса сейсмоэлектрического каротажа, принцип действия, состав аппаратуры, методика измерений и результаты применения на нефтяных месторождениях Оренбургской области. Приведены результаты скважинных натурных измерений, полученных при помощи предлагаемого аппаратного комплекса. Путем применения комплекса сейсмоэлектрического каротажа предлагается решение задачи детального выделения продуктивных пластов в карбонатном разрезе.

Ключевые слова: сейсмоэлектрический эффект, сейсмоэлектрический каротаж, скважина, метод потенциалов собственной поляризации, мегаэлектродный блок, каротажная диаграмма, горная порода, Оренбургская область

THE SEISMOELECTRIC EFFECT IS THE BASIS OF A NEW GEOPHYSICAL METHOD OF OIL WELL RESEARCH – SEISMOELECTRIC LOGGING

Cherdyntsev S.N.

LLC «Orenburggeoproect», Orenburg, e-mail: 89501818580@mail.ru

The article discusses the application of a new geophysical method of well research - seismoelectric logging in oil fields of the Orenburg region, based on the study and analysis of the seismoelectric effect that occurs in fluid-saturated sedimentary rocks as a result of their electrification with relative displacement of solid and liquid phases under the influence of elastic waves. A review of literature sources on the study of the seismoelectric effect in laboratory, field and borehole conditions is given. The physical prerequisites determining the possibilities of using a new geophysical method of oil well research - seismoelectric logging for solving specific geological, technical and scientific research tasks are described. The method of seismoelectric logging is based on the method of intrinsic polarization potentials with simultaneous acoustic impact on the study area and the use of a megaelectrode block. The application of the method of intrinsic polarization potentials for isolating reservoirs in the carbonate section and assessing the nature of their saturation is a rather difficult task and causes certain difficulties due to the weak differentiation and small amplitude of logging diagrams. Due to the imposition of an acoustic field on the study area and the use of a megaelectrode block when recording logging diagrams, the informativeness of the method of intrinsic polarization potentials is significantly increased. A brief description of the complex of seismoelectric logging, the principle of operation, the composition of the equipment, the measurement technique and the results of application in the oil fields of the Orenburg region is given. The results of borehole field measurements obtained using the proposed hardware complex are presented. By using a complex of seismoelectric logging, a solution to the problem of detailed isolation of productive layers in a carbonate section is proposed.

Keywords: seismoelectric effect, seismoelectric logging, well, method of intrinsic polarization potentials, megaelectrode block, logging diagram, rock, Orenburg region

Явления и эффекты, возникающие в геологической среде, представляют собой сложные механо-физические процессы, а также зависят от параметров источников полей и от физических свойств неоднородной многофазной среды. Взаимодействие сейсмического и электрического полей в настоящее время вызывает практический инте-

рес, связанный с возможностью создания новых методов изучения глубинных процессов, происходящих в скважинах.

Сейсмическое и электрическое поля – одни из самых изученных типов физических полей, которые существуют в геофизической среде, широко используются на практике (в разведке) и которые можно

эффективно создавать и измерять. Поэтому изучение их взаимных преобразований перспективно как с теоретической, так и с практической точек зрения [1].

В настоящей статье рассматривается возможность применения нового геофизического метода исследования нефтяных скважин – сейсмоэлектрического каротажа для решения ряда геологических, технических и научно-исследовательских задач.

Физической предпосылкой к практической реализации метода сейсмоэлектрического каротажа является экспериментальный факт наблюдения в горных породах, слагающих осадочный чехол земной коры, так называемых сейсмоэлектрических явлений.

Сейсмоэлектрический каротаж – метод геофизических исследований скважин, основанный на изучении сейсмоэлектрического эффекта горных пород, возникающего в результате их электризации при относительном смещении твердой и жидкой фаз под воздействием упругих волн и наблюдающийся преимущественно во флюидонасыщенных осадочных горных породах.

Под сейсмоэлектрическим каротажем понимается скважинный геофизический метод потенциалов собственной поляризации (ПС) при одновременном акустическом воздействии на исследуемое скважинное пространство.

Сейсмоэлектрический эффект второго рода Е был открыт в 1939 г. русским ученым А.Г. Ивановым при полевых геофизических исследованиях. Он обнаружил возникновение электризации при прохождении упругих волн через влажную горную породу, т.е. возникновение разности электрических потенциалов между двумя соседними точками данной горной породы при воздействии на нее упругим полем.

Предположение А.Г. Иванова о природе сейсмоэлектрического эффекта Е заключается в следующем. На границе раздела жидкой и твердой фаз (минерального раствора и твердых частиц горной породы) присутствует двойной электрический слой, одна часть которого, обращенная к жидкости, движется за счет перепада давлений. В результате этого возникает разность электрических потенциалов [2].

Впоследствии многими исследователями были продолжены работы по изучению сейсмоэлектрического эффекта.

В 1971 г. Э.И. Пархоменко и И.В. Гаскаровым были осуществлены скважинные и лабораторные исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в гор-

ных породах, была предложена методика наблюдений эффекта Е при непрерывной регистрации. На основании результатов опытов было установлено, что в скважинах действительно регистрируется сейсмоэлектрический эффект, возникающий в объеме осадочных пород, выявлено значительное различие между величиной сейсмоэлектрического эффекта в глинах и известняках (примерно в 5 раз), что служит основанием для возможности разделения этих пород по величине эффекта Е, отмечена качественная связь между величиной сейсмоэлектрического эффекта и кажущимся удельным сопротивлением горных пород. Это дает возможность судить о литологическом составе исследуемых горных пород и о флюидонасыщении коллекторов. Чем выше сопротивление, тем больше сейсмоэлектрический эффект. Получен различный характер зависимости сейсмоэлектрического эффекта от влажности для песчаников, известняков и мергеля. Для двух первых зафиксирован максимум, для третьего – область насыщения, т.е. некоторый интервал влажности, при котором эффект Е, достигнув максимума, практически не меняет свою величину. Различие, по-видимому, обусловлено неодинаковой структурой пород. Наблюдается сильная зависимость величины сейсмоэлектрического эффекта Е от концентрации раствора, заполняющего поры в породе. С увеличением степени минерализации насыщающего породу раствора величина эффекта Е уменьшается примерно по экспоненциальному закону [3].

В 2015 г. И.Г. Московским, О.М. Балабаном, О.С. Федоровой, А.В. Кочетковым была проведена работа «Математическое моделирование сейсмоэлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах». На основании полученных результатов рекомендовано использовать регистрацию сейсмоэлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн для нахождения области резких изменений петрофизических свойств влагонасыщенного пласта [4].

В 2018 г. В.И. Костицын и В.А. Хмелевской описали практическое применение явления сейсмоэлектрического эффекта в сейсморазведке. Показано, что сейсмоэлектрический эффект обусловлен электрокинетическими процессами влагонасыщенных пород. Он определяется их минеральным составом, структурой и текстурой, а в основном пористостью, влажно-

стью, составом и концентрацией растворенных в воде солей [5].

В 2019 г. И.Я. Чеботаревой и А.Н. Камшилиным были проведены эксперименты по изучению особенностей сейсмoeлектрического эффекта второго рода при сильной латеральной неоднородности насыщения с использованием керна песчаника, насыщенного керосином или водными растворами NaCl. Сделан вывод о том, что для неполярной жидкости при наличии петрофизической латеральной неоднородности по насыщению изменение электрического отклика на близких частотах существенно отличается. Рекомендовано для получения достоверных результатов при акустическом воздействии использовать не одну частоту, а линейно модулированный по частоте сигнал с широким диапазоном частот воздействия [6].

В 2020 г. В.А. Давыдовым были проведены опытно-методические сейсмoeлектрические работы на плотине Ельчевского пруда-отстойника. По результатам исследований построены разрезы различных сейсмoeлектрических параметров, хорошо отображающих основные особенности и структурные элементы плотины. Введенный параметр усиления амплитуды электрического сигнала при прохождении упругой волны позволил наглядно представить характер поведения фильтрационного потока в разрезе плотины [7].

В 2020 г. И.Я. Чеботаревой и А.Н. Камшилиным были проведены эксперименты, свидетельствующие о влиянии характера насыщения горных пород на особенности проявления сейсмoeлектрического эффекта [8].

Целью исследования явилось изучение и анализ характера взаимного влияния сейсмического и электрического полей – сейсмoeлектрического эффекта при скважинных измерениях посредством практического применения аппаратного комплекса сейсмoeлектрического каротажа на нефтяных месторождениях Оренбургской области для решения задачи детального выделения продуктивных пластов в карбонатном разрезе.

Материалы и методы исследования

Автором настоящей статьи был создан аппаратный комплекс сейсмoeлектрического каротажа, состоящий из скважинного прибора [9] и наземного цифрового регистратора. Комплекс предназначен для исследования нефтяных скважин диаметром от 110 до 400 мм, заполненных жидкостью, с температурой до 150 °С и гидростатическим давлением до 100 МПа со скоростью каротажа до 2500 м/ч.

Аппаратура рассчитана на работу со следующими изделиями:

а) каротажными станциями, оборудованными пультом измерительным акустического каротажа для создания акустического поля в зоне регистрации разности электрических потенциалов горных пород;

б) кабелем грузонесущим геофизическим [10];

в) каротажными станциями, оборудованными пультом измерительным электрического каротажа для визуализации и регистрации разности электрических потенциалов горных пород.

Аппаратура предназначена для измерения величины разности электрических потенциалов горных пород в нефтяных скважинах при вибровоздействии в высокочастотных режимах ВЧ1 6 кГц, ВЧ2 12 кГц и ВЧ3 24 кГц.

Принципиальная схема аппаратуры сейсмoeлектрического каротажа представлена на рис. 1.

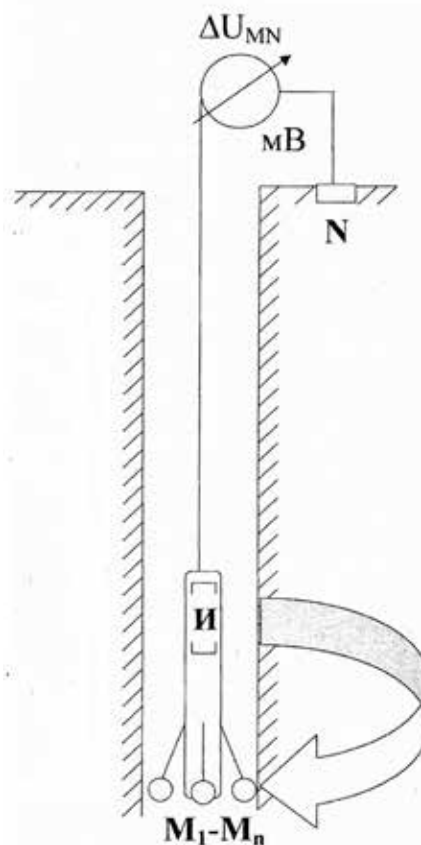
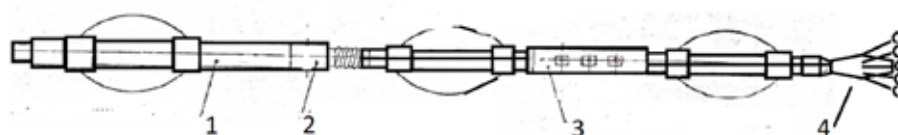


Рис. 1. Принципиальная схема аппаратуры сейсмoeлектрического каротажа:
N – электрод, заземленный на поверхности;
M₁-M_n – группа измерительных электродов, расположенных на прижимных устройствах;
И – магнотриксционный излучатель



1. Электронный блок
2. Блок излучателя
3. Блок звукоприемников
4. Мегаэлектродный блок

Рис. 2. Принципиальная схема скважинного прибора сейсмoeлектрического каротажа:
1 – электронный блок, 2 – блок излучателя, 3 – блок звукоприемников, 4 – мегаэлектродный блок

Скважинный прибор (рис. 2) выполнен на базе отечественного скважинного прибора акустического каротажа АКВ-1. Прибор включает в себя блок излучателя 2, состоящий из трех магнитострикционных сердечников, на которых намотаны катушки. Излучатель имеет три диапазона частот: Частота излучателя в режиме ВЧ3 – 24 кГц, в режимах: ВЧ1 – 6 кГц, ВЧ2 – 12 кГц. Излучатель резонансный, при возбуждении его мощным электрическим импульсом он излучает колебания определенной частоты, которая зависит от размеров сердечника и количества витков катушки. В режиме ВЧ1 работают три катушки (6 кГц), в режиме ВЧ2 – две, соединенных последовательно (12 кГц), в режиме ВЧ3 работает одна катушка (24 кГц). Смена режимов излучателя производится посредством наземного цифрового регистратора. В приборе АКВ-1 в качестве чувствительного элемента предложен мегаэлектродный блок 4 с выносными прижимными датчиками в количестве 24 штук, расположенными радиально оси прибора. Мегаэлектродный блок крепится к нижней части скважинного прибора посредством герметичного резьбового соединения. Такая конструкция глубинного зонда дает возможность измерения разности электрических потенциалов горных пород непосредственно на стенках скважины (на границе раздела горная порода – буровой раствор) и очевидно повышает точность, детальность исследований, следовательно, интерпретационную информативность проведенных геофизических измерений.

Все токоведущие части скважинного модуля надежно экранированы во избежание помех. Запись диаграмм разности электрических потенциалов горных пород при одновременном акустическом воздействии осуществляется при помощи третьей, неза-

действованной в приборе АКВ-1 свободной жилы относительно оплетки кабеля.

Для визуализации данных использовано программное обеспечение комплекса «Карат», которое дает возможность задания диапазона частот излучателя скважинного прибора и регистрацию диаграмм в режиме реального времени. Комплекс «Карат» позволяет также осуществлять диагностику и настройку скважинного прибора. Блок звукоприемников 3 применяется при проведении данным прибором акустических измерений. Электронный блок 1 служит для коммутации сигнала и связи с ЭВМ.

Автором настоящей статьи был получен патент на полезную модель «Устройство для измерения естественных электрических потенциалов горных пород при акустическом воздействии на зону исследования» [9] и проведены натурные исследования в скважинах ряда нефтяных месторождений Оренбургской области.

Объектом исследований послужили продуктивные коллекторы нефтяных скважин – известняки (карбонатный разрез).

Выделение продуктивных коллекторов в карбонатном разрезе является основной задачей, стоящей перед методом сейсмoeлектрического каротажа.

Пласты в карбонатном разрезе делятся на две группы: пласты высокого сопротивления (свыше 100 Ом*м) и пласты низкого сопротивления (1–100 Ом*м) [11].

К первой группе относятся низкопористые нефте- или газонасыщенные карбонатные породы, вторая группа представлена водонасыщенными и глинистыми карбонатными пластами.

В карбонатном разрезе продуктивные пласты не имеют тех характерных признаков, которые можно увидеть на диаграммах ПС для терригенного разреза.

Поэтому использование данных метода потенциалов собственной поляризации для выделения в карбонатном разрезе коллекторов и оценки характера их насыщенности представляет достаточно сложную задачу и вызывает определенные трудности в связи со слабой дифференцированностью и малой амплитудой диаграмм.

Эту задачу автор предлагает решить путем применения разработанного им комплекса сейсмоэлектрического каротажа.

Целью внедрения способа сейсмоэлектрического каротажа является повышение информативности метода потенциалов собственной поляризации за счет наложения акустического поля на зону исследования при записи диаграмм и применения мегаэлектродного блока [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Целью каротажных исследований являлось выявление зависимости величины разности электрических потенциалов горных пород и ее морфологии от частоты упругих колебаний, а также целесообразность использования мегаэлектродного блока – группы 24 измерительных электродов при исследованиях методом сейсмоэлектрического каротажа.

Каротажные исследования в открытом стволе проводились при бурении нефтяной скважины на месторождении Оренбургской области в соответствии с ГОСТ 32358-2013 [13].

Величина минерализации бурового раствора при записи составила порядка 0,5%. Минерализация пластовой воды составила порядка 1,7%.

В этом случае величина минерализации бурового раствора меньше минерализации пластовых вод, следовательно, имеет место «прямое поле ПС». Максимумы выделяются непроницаемые горные породы (глины, аргиллиты), а минимумами, соответственно, проницаемые горные породы (пористые известняки, песчаники).

На рис. 3 отображены диаграммы ПС, записанные одним измерительным электродом (а), и диаграммы, записанные предлагаемым прибором, где в качестве чувствительного элемента использована группа измерительных электродов в количестве 24 штук, расположенных на прижимном устройстве радиально по оси скважинного прибора (б). Из рисунка видно, что применение группы электродов дает приращение кривой ПС и изменение ее дифференцированности. В данном случае на диаграмме, полученной

при записи 24 электродами, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения на диаграмме относительно фонового замера ПС одним измерительным электродом.

На рис. 4 представлены диаграммы ПС, записанные предлагаемым аппаратурным комплексом сейсмоэлектрического каротажа при различных значениях частоты акустического воздействия:

а) запись кривой ПС (фоновая запись);

б) запись кривой ПС при одновременном акустическом воздействии с частотой излучателя 6 кГц;

в) запись кривой ПС при одновременном акустическом воздействии с частотой излучателя 12 кГц;

г) запись кривой ПС при одновременном акустическом воздействии с частотой излучателя 24 кГц.

Из рис. 4, б, видно, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 6 кГц дает приращение диаграммы ПС относительно фонового замера ПС – изменение ее дифференцированности. В данном случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии частотой 6 кГц, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения на диаграмме относительно фонового замера ПС.

Из рис. 4, в, следует, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 12 кГц дает большее приращение диаграммы ПС, а также наблюдается изменение ее морфологии относительно фонового замера ПС и относительно замера при частоте излучения 6 кГц. В этом случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии частотой 12 кГц, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения относительно фонового замера ПС и относительно записи при частоте излучателя 6 кГц. Рис. 4, г, ярко отображает, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 24 кГц дает еще большее приращение диаграммы ПС, а также наблюдается изменение ее морфологии относительно фонового замера ПС и относительно замеров при частотах излучения 6 кГц, 12 кГц. В этом случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии с частотой 24 кГц, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются также дополнительные приращения на диаграмме относительно фонового замера ПС и относительно записи при частоте излучателя 6 кГц и 12 кГц.

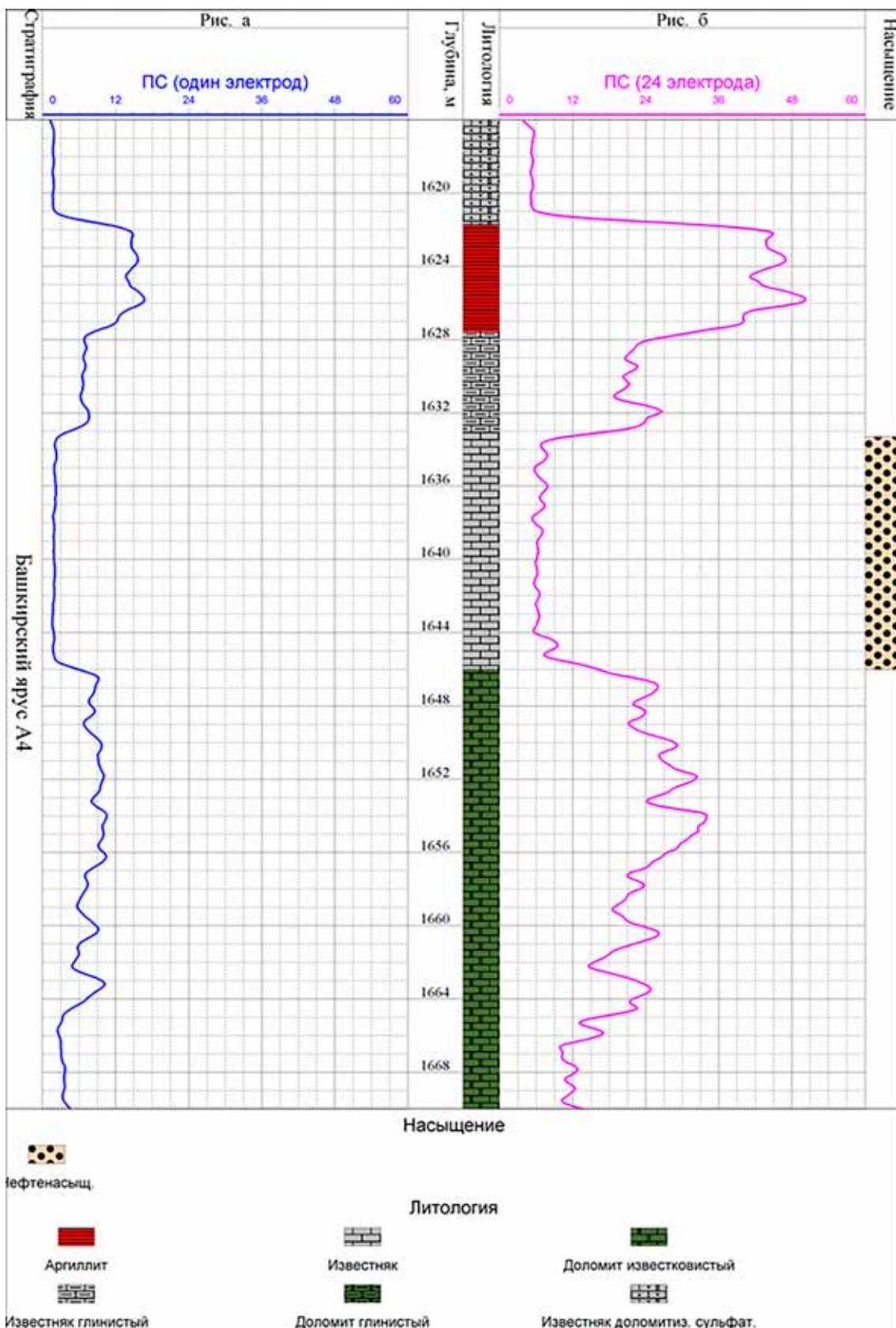


Рис. 3. Каротажные диаграммы ПС, полученные при записи одним измерительным электродом (а), при помощи группы измерительных электродов (24 штук) (б)

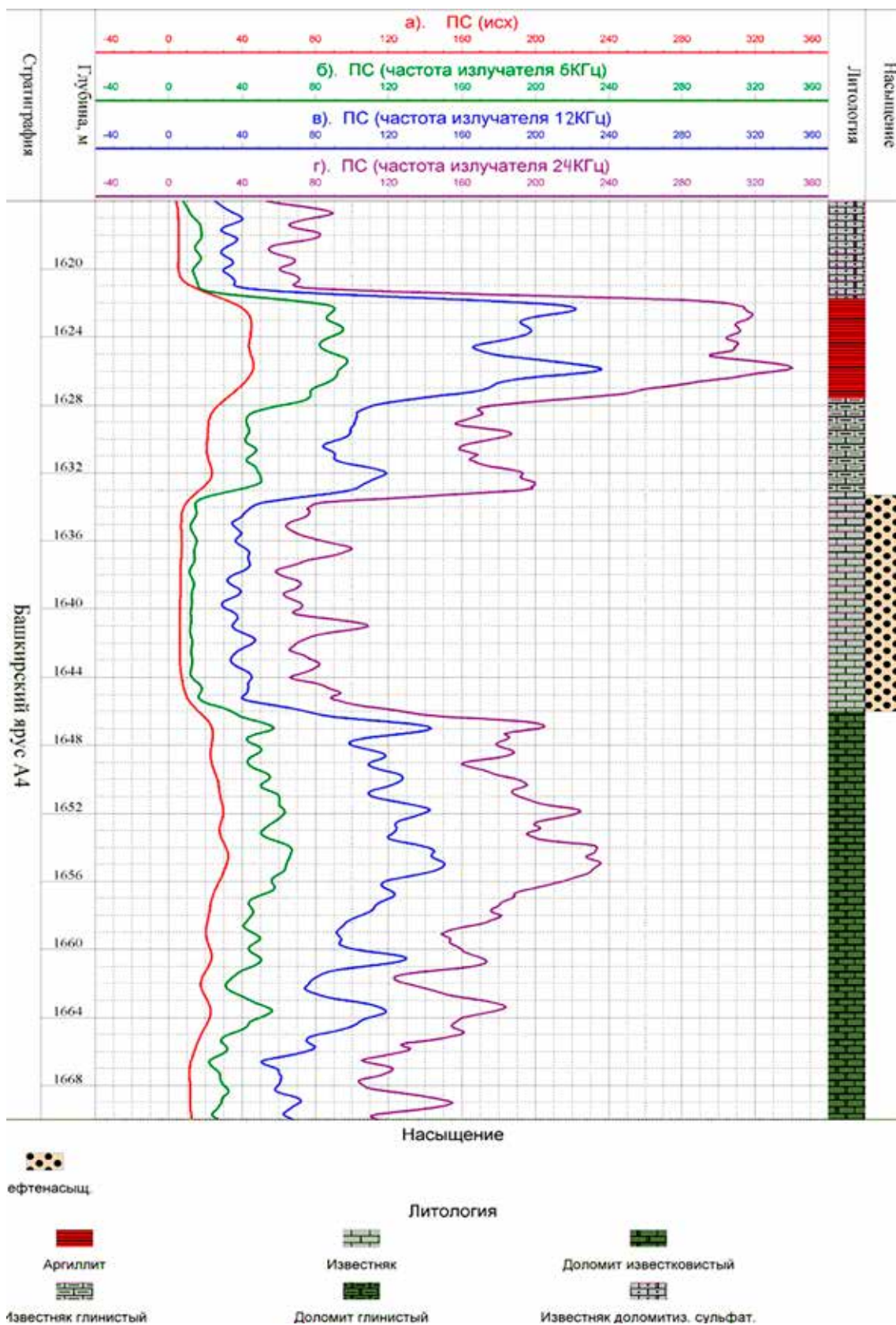


Рис. 4. Каротажные диаграммы ПС, фоновый замер (а), диаграммы сейсмoeлектрического каротажа при частоте излучателя: 6 кГц (б), 12 кГц (в), 24 кГц (г)

Из рис. 4, б–г, видно, что применение акустического воздействия при каротажных измерениях методом ПС повышает информативность данного метода, а именно: чем больше частота акустического воздействия на зону исследования, тем больше значение величины аномалии диаграммы ПС. Также из проведенных скважинных измерений следует, что чем больше величина частоты приложенного акустического воздействия, тем в большей степени наблюдается изменение морфологии полученной диаграммы ПС и, как следствие, приращение величины аномалии ПС. Наблюдаются дополнительные приращения, возникающие вследствие акустического воздействия на зону исследования.

Применение акустического воздействия на зону исследования позволяет более детально судить о геологическом строении и о параметрах физико-емкостных свойств (ФЭС) исследуемых горных пород, что показано на рис. 4.

Применение группы измерительных электродов позволяет регистрировать изменение величины параметра электрических потенциалов непосредственно на границе раздела горная порода – буровой раствор.

Из вышесказанного следует, что применение метода сейсмoeлектрического каротажа целесообразно для решения определенных важных задач геофизической интерпретации нефтяных скважин.

Заключение

Создание и применение комплекса нового метода исследований нефтяных скважин – сейсмoeлектрического каротажа, основанного на изучении и анализе взаимного влияния сейсмического и электрического полей – сейсмoeлектрического эффекта, позволяет с более высокой точностью и достоверностью производить выделение продуктивных коллекторов и судить о характере их насыщения в карбонатном разрезе в отличие от метода потенциалов собственной поляризации, что достигается за счет наложения акустического поля различной частоты на зону исследования и применения мегаэлектродного блока при скважинных измерениях ПС.

Внедрение комплекса позволит продолжить исследования сейсмoeлектрического эффекта в нефтяных скважинах; исследования связи сейсмoeлектрического эффекта

с литологией пород и наличием углеводородов в исследуемых пластах; исследования по разработке оптимальных методик сейсмoeлектрических наблюдений, а также позволит решить многочисленные задачи промышленной геологии и геофизики, такие как детальное литолого-стратиграфическое расчленение исследуемого геологического разреза, определение коллекторских свойств и характера флюидонасыщенности пластов.

Список литературы

1. Казначеев П.А., Камшилин А.Н. Нелинейные механоэлектрические преобразования в пористых средах: теоретические предпосылки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 7. С. 83–103. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-83-103.
2. Иванов А.Г. Сейсмoeлектрический эффект 2 рода // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. 1940. № 5. С. 699–727.
3. Пархоменко Э.И., Гаскаров И.В. Скважинные и лабораторные исследования сейсмoeлектрического эффекта второго рода в горных породах // Известия АН СССР, труды института физики Земли. 1971. № 9. С. 88–92.
4. Московский И.Г., Балабан О.М., Федорова О.С., Кочетков А.В. Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах // Наукоедение. 2015. Т. 7. № 1.
5. Костицын В.И., Хмелевской В.А. Геофизика. Пермский государственный национальный университет. Пермь, 2018. 428 с.
6. Чеботарева И.Я., Камшилин А.Н. Влияние неоднородного насыщения образцов горных пород полярными и неполярными жидкостями на их электрический отклик при вибровоздействии // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 87–102. DOI: 10.21455/gr2019.3-6.
7. Давыдов В.А. Сейсмoeлектрические исследования на грунтовой плотине – Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН. Екатеринбург // Уральский геофизический вестник. 2020. № 4 (42). DOI: 10.25698/UGV.2020.4.4.21.
8. Чеботарева И.Я., Камшилин А.Н. Особенности электрического отклика горных пород на вибровоздействие в условиях слабого неравномерного флюидонасыщения // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 1. С. 58–70.
9. Чердынцев С.Н., Масленников В.И. Устройство для измерения естественных электрических потенциалов горных пород при акустическом воздействии на зону исследования. Патент РФ № 81526. Патентообладатель Чердынцев С.Н. 2007. Бюл. № 8.
10. ГОСТ 331944-2012. Кабели грузонесущие геофизические бронированные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
11. Сковородников И.Г. Геофизические исследования скважин. 4-е изд., перераб. и доп. Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2014. 456 с.
12. Чердынцев С.Н. Повышение информативности метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) посредством применения акустического воздействия на зону исследования. НТВ «Каротажник». № 8. Тверь, 2007. С. 61–65.
13. ГОСТ 32358-2013. Скважины нефтяные и газовые. Геофизические исследования и работы в скважинах. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.