

УДК 550.837

С. Ю. БАЛАСАНЯН, В. А. КОБЫЛЬСКИЙ

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ ЭФФЕКТА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ИОНОПРОВОДЯЩИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Вопросу экспериментального изучения вызванной поляризации (ВП) ионопроводящих сред (под последним обычно подразумеваются горные породы) уделялось и уделяется большое внимание, поскольку решение этой задачи имеет прямой выход на практику почти во все области геологии (инженерную, гидрогеологическую, рудную и т. д.).

По сложившимся за последние годы представлениям, в общем спаде процесса ВП исследователи-геофизики отмечают наличие быстрой и медленной стадий, проявляющихся на разных временных интервалах. При этом, если медленная стадия процесса спада изучалась геофизиками с самого основания метода ВП (1912 г.), то исследования быстрой стадии стали проводиться относительно недавно и сравнительно небольшим кругом исследователей, впервые серьезно обративших внимание на быструю стадию, как на вероятный источник дополнительной геологической информации.

Переход от изучения эффекта ВП через сотни миллисекунд после выключения поляризующего тока, к десяткам, единицам и десятым долям единицы миллисекунд, с небольшими временами зарядки среды, происходил по мере создания специальной регистрирующей аппаратуры и соответствующей методики наблюдения. Наиболее быстрой регистрации ВП, через 0,1 мсек после выключения поляризующего импульса длительностью в 20 мсек, правда, при изучении электропроводящих сред, достигла группа исследователей под руководством А. П. Карасева из ЗабНИИ МГ СССР [1]. Им же была высказана идея об исследовании эффекта ВП в том же временном диапазоне и в ионопроводящих средах.

Таким образом, успехи в области методики и техники наблюдения эффекта ВП привели к возможности изучения этого явления в широком временном диапазоне. Что же касается вопроса о природе процесса, то он, на наш взгляд, так и остается открытым. А ведь с ним непосредственно связана правильная интерпретация полученных результатов и вообще решение поставленной геологической задачи.

О природе вызванной поляризации ионопроводящих сред (горных пород) существует множество гипотез. Мы не станем следовать традиции и приводить перечень этих представлений и их авторов (потому как работа наша имеет совершенно иную направленность), а ограничимся лишь двумя из них, которые, на наш взгляд, наилучшим образом характеризуют современное состояние вопроса. Здесь в первую очередь сле-

дует назвать гипотезу диффузионных потенциалов, получившую наибольшую распространенность и признание в геофизике. Она выдвинута А. Ф. Постельниковым [4] и поддержана химиками Д. А. Фридрихсбергом и М. П. Сидоровой [6]. Основная ее идея заключается в том, что разница в числах переноса ионов в порах различного сечения капиллярной среды приводит, при пропускании электрического тока, к изменениям концентрации ионов в них (порах) и к возникновению диффузионных потенциалов.

Следующая гипотеза, заслуживающая, как нам кажется, особого внимания, принадлежит Г. Д. Кричари и Е. К. Варфоломеевой [3].

Исследования, проведенные ими на осадочных горных породах, в миллисекундном диапазоне времен наблюдения, привели к тому заключению, что быстрый и затем медленный характер убывания потенциалов ВП в общей кривой спада этого процесса связан с тем, что ионы двойного слоя и «свободного» раствора находятся в различных энергетических условиях и при наложении внешнего поляризующего поля смешаются по различным законам с различной скоростью.

Этот вывод, по мнению авторов, прямо указывает на то, что процесс ВП состоит, как минимум, из двух составных частей, имеющих различную физическую природу.

Основная цель проведенной нами работы заключалась в следующем:

1. Установить экспериментальным путем факт наличия или отсутствия эффекта ВП в ионопроводящих средах через 0,1 мсек после выключения однократно зондирующего импульса длительностью в 10 и более миллисекунд.

2. В случае наличия эффекта ВП, уяснить каким образом это явление укладывается в рамки существующих гипотез о природе вызванной поляризации.

Методика и техника эксперимента

Методика проведенного нами эксперимента заключалась в регистрации эффекта ВП в специальной электролитической ячейке, через 0,1—0,2 мсек после прохождения однократно зондирующего среду импульса длительностью в 10, 30, 10^2 , $3 \cdot 10^2$, 10^3 , $3 \cdot 10^3$, 10^4 , $3 \cdot 10^4$, 10^5 и $3 \cdot 10^5$ мсек.

В качестве ионопроводящей среды использовался чистый кварцевый песок с фракцией 1 мм и затем глина, в водном растворе медного купороса с концентрацией 500 мг/л.

В электролитической ячейке размером $4 \times 4 \times 8$ см создавались плотности тока (j) величиной от 0,01 мкА/см² до 6 мкА/см².

Подобный диапазон плотностей тока был обусловлен тем, что в природных условиях, как это показывают простые расчеты, j не превосходит 0,01 мкА/см². Включение же в эксперимент плотностей тока порядка

десятых долей и единиц микроампер было продиктовано желанием сверить полученные при этом результаты с данными исследователей, которые имеют публикации в области экспериментального (лабораторного) изучения ВП в ионопроводящих средах.

Выбранные экстремальные параметры в эксперименте, т. е. высокая концентрация раствора (500 мг/л), малая величина зондирующего импульса (10 мсек), крупная фракция кварцевого песка (1 мм), малая плотность тока (0.01 мкА/см²) служили исходными для установления условий, в которых начинает проявляться эффект ВП. Таким образом, стало возможным, с одной стороны, ответить на поставленный вопрос о существовании эффекта ВП в ионопроводящих средах, при зарядке среды импульсом длительностью в 10 мсек, а с другой—проверить существующие гипотезы относительно природы ВП.

Итак, измерения ВП осуществлялись на собранной нами экспериментальной установке, блок-схема которой изображена на рис. 1.

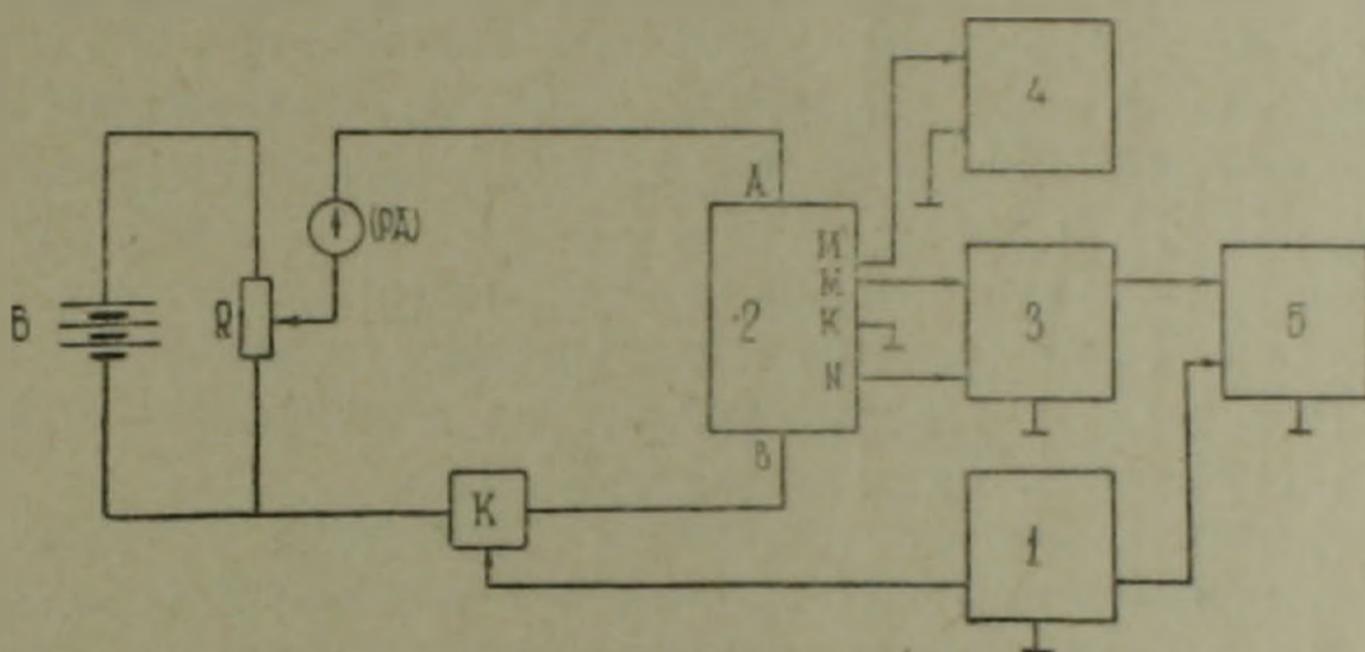


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки 1—генератор одиночных импульсов, 2—электролитическая ячейка, 3—усилитель, 4—осциллограф С1—68, 5—осциллограф, запоминающий С8—9А, К—электронный ключ, Б—батарея, R—потенциометр, РА—микровольтметр.

Через электролитическую ячейку (2) с помощью питающих, от батареи Б, электродов А и В пропускались одиночные импульсы тока, длительность которых задавалась генератором (1).

Сила тока в импульсе регулировалась потенциометром и контролировалась микроамперметром (РА).

Через приемные электроды М и N сигнал поступал на дифференциальный усилитель (3) и запоминающий осциллограф С8—9А (5), синхронизация развертки которого осуществлялась задним фронтом питающего импульса.

Чтобы не было гальванической связи между приемными и питающими электродами, в задающий генератор была введена специальная цепь запускающего импульса.

В соответствии с требованиями эксперимента усилитель был собран на микросхеме К284УД1В и имел следующие электрические параметры:

коэффициент усиления 60 дБ, полоса пропускаемых частот 0—200 кГц, коэффициент ослабления синфазного сигнала ≥ 70 дБ, междупиковое напряжение шумов ≥ 6 мкВ, входное сопротивление на частоте 1000 Гц ≥ 5 мом, входное сопротивление постоянному току 150 мом.

Во избежание шунтирования приемных электродов сопротивлением смещения усилителя в качестве него (сопротивления) использовались участки среды между электродами—МК и КН. Для этого в электролитическую ячейку (рис. 1), по середине между приемными электродами М и N, был установлен специальный электрод К, который служил для заземления всей установки.

Регистрация величины создаваемого в электролитической ячейке напряжения ($\Delta U_{пр}$) осуществлялась путем введения непосредственно за электродом М дополнительного электрода М', и тогда искомое напряжение измерялось между ним и электродом К. Затем полученные значения $\Delta U_{пр}$ удваивались и таким образом относились к участку MN. Подобное разделение электрода М позволило избежать шунтирования приемной цепи входным сопротивлением осциллографа (4).

Одним из основных моментов в проведении эксперимента был учет погрешностей, вносимых различными узлами экспериментальной установки.

Вычисление абсолютной погрешности (систематической), вносимой использованной нами симметричной установкой, производилось по разработанной методике и осуществлялось для всех значений тока в питающей цепи в каждый момент времени.

Погрешность, вносимая операционным усилителем и также относящаяся к разряду систематических, определялась точностью подбора корректирующих сопротивлений.

Проведенный анализ показал, что суммарная погрешность измерений определяется, в основном, погрешностью регистрирующего прибора С8—9А и составляет 10%.

Таким образом, собранная экспериментальная установка имела следующие технические характеристики:

Чувствительность—7 мкВ/мм.

Напряжение наводки частотой 50 Гц—2.5 мкВ.

Интервал плотности тока зарядки— $10^{-6} \div 6$ мкА/см².

Выброс напряжения при максимальной плотности тока — < 10 мкВ.

Погрешность измерения амплитуды напряжения—10%.

Здесь следует отметить то обстоятельство, что толщина луча запоминающего осциллографа равнялась 1 мм, и, следовательно, напряжение шумов практически не просматривалось нами на его экране. В итоге полезный (низкочастотный) сигнал, даже порядка единиц микровольт, можно было с уверенностью регистрировать на экране осциллографа.

Анализ полученных результатов

Анализируя данные, полученные в ходе эксперимента (табл. 1 и 2), мы пришли к следующим основным выводам.

Таблица 1
Результаты измерений вызванной поляризации кварцевого песка в растворе медного купороса

t (мсек)	$j = 0,01 \text{ мкА/см}^2$				$j = 6 \text{ мкА/см}^2$			
	$U_{\text{вп}}$ (мкв) через 0,1 мсек	$\Delta U_{\text{вп}}$ (мкв) между 0,1—0,2	τ (мсек)	$\Delta U_{\text{пр}}$ (мв)	$U_{\text{вп}}$ (мкв) через 0,1 мсек	$\Delta U_{\text{вп}}$ (мкв) между 0,1—0,2	τ (мсек)	$\Delta U_{\text{пр}}$ (мв)
10	7	7	0,15	0,6	21	21	0,2	50
30	14	14	0,2	0,6	21	21	0,2	50
10^2	0	0	0	0,6	0	0	0,1	50
$3 \cdot 10^2$	0	0	0	0,6	0	0	0,1	50
10^3	7	7	0,15	0,6	14	14	0,2	50
$3 \cdot 10^3$	7	7	0,15	0,6	7	7	0,2	50
10^4	0	0	0,1	0,6	7	7	0,2	50
$3 \cdot 10^4$	14	14	0,2	0,6	7	7	0,2	50
10^5	0	0	0	0,6	0	0	0	50
$3 \cdot 10^5$	7	3	0,3	0,6	0	0	0,05	50

Таблица 2

Результаты измерений вызванной поляризации глин в растворе медного купороса

t (мсек)	$j = 0,01 \text{ мкА/см}^2$				$j = 6 \text{ мкА/см}^2$			
	$U_{\text{вп}}$ (мкв) через 0,1 мсек	$\Delta U_{\text{вп}}$ (мкв) между 0,1—0,2	τ (мсек)	$\Delta U_{\text{пр}}$ (мв)	$U_{\text{вп}}$ (мкв) через 0,1 мсек	$\Delta U_{\text{вп}}$ (мкв) между 0,1—0,2	τ (мсек)	$\Delta U_{\text{пр}}$ (мв)
10	0	0	0,1	0,3	119	21	10	16
30	0	0	0,1	0,3	126	28	15	16
10^2	0	0	0,1	0,3	140	14	25	16
$3 \cdot 10^2$	0	0	0,1	0,3	140	14	50	16
10^3	7	7	0,2	0,3	140	14	80	16
$3 \cdot 10^3$	7	7	0,2	0,3	140	7	160	16
10^4	7	7	0,2	0,3	140	14	160	16
$3 \cdot 10^4$	7	7	0,2	0,3	140	7	100	16
10^5	7	7	0,2	0,3	140	7	140	16
$3 \cdot 10^5$	7	7	0,2	0,3	140	7	140	15

1. В ионопроводящих средах, даже при длительности поляризующего импульса в 10 мсек, причем при экстремальных условиях эксперимента (они описаны в разделе «Методика и техника эксперимента») эффект ВП существует. А это означает, что природа «ранней» стадии процесса связана не только с реакцией перехода, как это предполагалось ранее [1], а и с другими видами перенапряжения.

В свете полученных данных, ведущая в настоящее время диффузионная теория (о ней уже было сказано выше) лишь частично отражает

механизм образования ВП в ионопроводящих средах. Подобный вывод следует из того, что при экстремальных условиях проведенного нами эксперимента, по существующей диффузионной теории, эффект ВП наблюдаться не должен [5].

Основными причинами сделанных Д. А. Фридрихсбергом и М. П. Сидоровой выводов о диффузионной природе ВП в ионопроводящих геологических средах, на наш взгляд, является, во-первых, весьма ограниченная разрешающая способность использованных ими экспериментальных установок, во-вторых, чисто электрохимическая направленность опытов, что нашло свое отражение в выборе соответствующей методики и техники наблюдения эффекта ВП, и, в-третьих—формальный перенос решенных ими чисто электрохимических задач из электрохимии и коллоидной химии в геофизику.

Наш вывод о более сложной (нежели диффузионная) природе ВП в ионопроводящих средах подтверждается и экспериментом, проведенным Г. А. Кринами, сделавшим устное сообщение о том, что им получен в миллисекундном диапазоне наблюдения довольно значительный эффект ВП, при сильном ускорении электролита с частицами глины в специальной кольцевой установке, напоминающей «кольцевой ускоритель».

2. Эффект ВП с увеличением длительности зондирующего импульса либо то появляется, то исчезает (табл. 1), либо возрастает до определенного предела и перестает изменяться (табл. 2).

Этот быть может несколько неожиданный экспериментальный факт приводит к следующим заключениям:

а) Релаксационный процесс в данных условиях равен или происходит быстрее 0,1 мсек и поэтому мы при нашей методике наблюдения не можем регистрировать величину ВП.

Так, например, из табл. 1 видно, что при $j=0,01$ мкА/см² и $t=10^4$ мсек, а также при $j=6$ мкА/см² и $t=10^2, 3 \cdot 10^2, 3 \cdot 10^5$ мсек,—эффект ВП равен нулю (в нашем диапазоне измерений), а время релаксации τ равно или меньше 0,1 мсек.

б) Процесс ВП частично необратим.

Не останавливаясь на первом заключении из-за его очевидности, остановимся подробнее на втором.

Обычно все до сих пор выдвигаемые гипотезы касательно природы ВП базировались на том неопровержимом предположении, что процесс ВП является обратимым, ибо иначе нарушается основной принцип поискового применения электроразведки—воспроизводимость наблюдаемых полей. Однако в объяснении результатов проведенного нами эксперимента это предположение не употребимо, т. к. в этом случае с увеличением длительности поляризующего импульса эффект ВП должен был закономерно возрастать, чего мы, как это видно из таблиц 1 и 2, не наблюдаем.

Кстати, здесь будет небезынтересно вспомнить электрохимию, к результатам которой мы привыкли так часто обращаться, особенно при объяснении природы процесса ВП. Так, в электрохимической кинетике, электрохимическая поляризация (а именно с ней и принято отождест-

влять эффект ВП [2]) определяется, как процесс необратимый, признаком которого является отклонение искомым потенциалов от равновесного состояния. В итоге получается явное противоречие, с одной стороны эффект ВП и электрохимическая поляризация это одно и то же, а с другой, в геофизике, по существующим понятиям, это явление обратимо, а в физхимии—необратимо.

В нашем представлении эффект ВП состоит из обратимых и необратимых процессов. Если говорить о полевых (натурных) исследованиях, проводимых по стандартной методике (т. е. регистрации поздней стадии процесса ВП), то здесь весьма малые плотности тока, которые создаются полевыми установками, вызывают в земле, в основном, большую массу обратимых процессов (например, таких как внедрение ионов в пограничную зону без перехода из одной фазы в другую, или перераспределение зарядов в двойном электрическом слое без изменения его среднего количественного или качественного состава и т. д.) и одновременно, в небольшом количестве, вполне достаточном для протекающего тока в среде—необратимые процессы. В результате получается, что при измерениях в поздней стадии ВП (по стандартной методике и с серийной аппаратурой) величина необратимых процессов входит в пределы ошибки измерения, и создается впечатление полной обратимости процесса. А вот при измерениях в ранней стадии ВП роль необратимых процессов (перенос тока), настолько велика, что они становятся сравнимыми с обратимыми процессами и поэтому непременно проявляются в виде плохой воспроизводимости измерений.

Что касается проведенного нами лабораторного эксперимента, то здесь к вышеизложенным причинам частичной необратимости процесса ВП прибавляются еще и такие, как: сравнительно малый объем электролитической ячейки; относительно большая плотность поляризующего тока; сравнительная однородность как жидкой, так и твердой фаз; малые значения эффекта ВП ввиду экстремальных условий эксперимента и другие. Все эти факторы увеличивают удельный вес необратимых процессов и приводят к тому, что частичная необратимость эффекта ВП наблюдается и в поздних стадиях.

В ы в о д ы

1. В ионопроводящих средах, даже при длительности поляризующего импульса ток в 10 мсек, наблюдается эффект ВП.
2. Эффект ВП в ионопроводящих средах носит более сложный характер и имеет более глубокие причины, нежели это представлялось до сих пор диффузионной теорией.
3. Процесс ВП в геологических средах частично необратим. Степень необратимости увеличивается от поздней стадии процесса к ранней и, таким образом, зависит, в основном от того, в какой стадии находится эффект ВП.

II. Յու. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ. Վ. Ա. ԿՈԲՒԼՍԿԻ

ՆՈՐ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐ ԻՈՆԱՀԱՂՈՐԴԻՉ ԵՐԿՐԱԲԱՆԱԿԱՆ
ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ՀԱՐՈՒՅՎԱԾ ԲԵՎԵՌԱՑՄԱՆ ԷՖԵԿՏԻ
ԲՆՈՒՅԹԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ա մ փ ո փ ու մ

Ներկայացված ուսումնասիրության հիմնական նպատակն է փորձարարական եղանակով հաստատել իոնահաղորդիչ միջավայրերում հարուցված բևեռացման (ՀԲ) էֆեկտի առկայության կամ բացակայության փաստը, որն արտահայտվում է 10 և ավելի միլիվայրկյան տևողությամբ միակի զոնդացնող իմպուլսի անջատելուց 0,1 միլիվայրկյան հետո, ինչպես նաև, ՀԲ էֆեկտի առկայության դեպքում պարզաբանել, թե ինչպես է այդ երևույթը հարմարվում ՀԲ բնույթի մասին գոյություն ունեցող վարկածներին:

Գատարված փորձերի հետևանքով պարզված է, որ իոնահաղորդիչ միջավայրում նույնիսկ հոսանքի բևեռացնող իմպուլսի 10 միլիվայրկյան տևողության դեպքում նկատվում է ՀԲ էֆեկտը:

ՀԲ էֆեկտը իոնահաղորդիչ միջավայրերում ունի ավելի բարդ բնույթ և ավելի խոր պատճառներ, քան այդ պատկերացվում էր մինչև հիմա դիֆուզիոն տեսության համաձայն:

Երկրաբանական միջավայրերում ՀԲ երևույթը մասնակիորեն անհետադարձելի է: Անհետադարձելիության աստիճանը մեծանում է երևույթի ուշ փուլից դեպի վաղը և, այսպիսով, հիմնականում կախված է այն բանից, թե ՀԲ էֆեկտն իր զարգացման որ փուլում է գտնվում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карасев А. П., Сейфулин Р. С., Бумагин О. В., Красников В. И. Применение временных характеристик ранней стадии вызванной поляризации при поисках сульфидных месторождений. М., «Недра», 1973.
2. Комаров В. А. Электроразведка методом вызванной поляризации. «Недра», Л., 1972.
3. Кринари Г. А., Варфоломеева Е. К. Некоторые данные о явлениях вызванной поляризации. «Аппаратура, методика и интерпретация геофизических наблюдений». Казань, 1965.
4. Постельников А. Ф. К вопросу о природе вызванной поляризации в осадочных горных породах. «Изв. ВУЗов Геология и разведка», № 2, 1959.
5. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М., «Химия», 1967.
6. Фридрихсберг Д. А., Сидорова М. П. Исследования связи явления вызванной поляризации с электрокинетическими свойствами капиллярных систем. Вестн. ЛГУ, сер. физики и химии, вып. 1, № 4, 1961.