

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ им. А.А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



**Недропользование. Горное дело.
Направления и технологии поиска,
разведки и разработки месторождений
полезных ископаемых. Экономика.
Геоэкология.**

Материалы XVI международной научной конференции



Новосибирск

20-24 апреля, 2020

Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы XVI международной конференции (20-24 апреля 2020, Новосибирск) / Сетевое электронное издание. – Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. –Новосибирск. 2020. xxx с.

ISBN 978-5-4262-0102-6

doi: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020

Программный комитет:

Координаторы:

Ельцов Игорь Николаевич, д.т.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Кондратенко Андрей Сергеевич, ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Конторович Алексей Эмильевич, академик РАН, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Неволько Александр Иванович, начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», г. Новосибирск

Эпов Михаил Иванович, академик РАН, ИНГГ СО РАН, СНИИГГиМС, г. Новосибирск

Сопредседатели:

Ельцов Игорь Николаевич, д.т.н. ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Каширцев Владимир Аркадьевич, чл.-корр. РАН, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Филимонова Ирина Викторовна, д.э.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Секретари:

Комарова Анна Владимировна, к.э.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: KomarovaAV@ipgg.sbras.ru

Левичева Александра Викторовна, к.г.-м.н., СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Сурикова Екатерина Сергеевна, к.г.-м.н., СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: SurikovaES@ipgg.sbras.ru

Чеботарева Анастасия Владимировна, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: ChebotarevaAV@ipgg.sbras.ru

Шумскайте Мария Йоновна, к.т.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: ShumskaitesMI@ipgg.sbras.ru

Адрес оргкомитета: Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект ак. Коптюга, 3, ИНГГ СО РАН.

При поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Самостоятельное неперiodическое локальное статичное научное сетевое электронное издание. Системные требования: наличие на устройстве ПО для просмотра PDF-файлов.

Статьи публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-4262-0102-6

© ИНГГ СО РАН, 2020

ЭФФЕКТЫ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ В МЕТОДЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Николай Олегович Кожевников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, тел. (383) 333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

Обсуждаются эффекты вызванной электрической поляризации и магнитной вязкости в методе переходных процессов. Показано, что поляризуемость среды влияет на становление вихревых токов. Измерив индукционную переходную характеристику, можно найти вертикальное распределение поляризуемости. Однако проявление магнитной вязкости не зависит от становления вихревых токов. Поэтому индукционные переходные характеристики не содержат информацию о пространственном распределении магнитной вязкости.

Ключевые слова: метод переходных процессов, вызванная поляризация, магнитная вязкость.

AFTEREFFECTS IN THE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD

Nikolay O. Kozhevnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, 3, Akademik Koptyug Ave., Novosibirsk, Ph. D., Prof., Principal Scientist, phone: (383) 333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Evgeniy Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, 3, Akademik Koptyug Ave., Novosibirsk, Ph. D., Principal Scientist, phone: (383) 333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

We discuss the effect of induced electric polarization and magnetic viscosity on induction transient response. Since eddy currents evolution depends on induced polarization properties, one can, by measuring the induction transient response, find the distribution these properties in the ground. However, the magnetic viscosity effect is decoupled from that produced by eddy currents. Therefore, induction transient response does not contain information about the spatial distribution of magnetic viscosity.

Key words: transient electromagnetic method, induced polarization, magnetic viscosity.

Введение

Основным параметром геологической среды, изучаемым методами электроразведки, является удельная электропроводность σ (или удельное

электрическое сопротивление $\rho=1/\sigma$). Обычно предполагается, что σ или ρ не зависят от времени / частоты, т. е. эффекты последствия в геологической среде отсутствуют. В электромагнитных методах электроразведки принимается также, что магнитная проницаемость геологической среды не зависит от времени или частоты. Однако нередко такие эффекты проявляются в виде вызванной электрической поляризации (ВП) и релаксации намагниченности, или магнитной вязкости (МВ).

Как правило, вызванная поляризация изучается установками с гальваническим возбуждением и измерением электрического поля. Однако вызванная поляризация проявляется и в индуктивной электроразведке, особенно в методе переходных процессов. Эффекты магнитной вязкости также наиболее выражены именно в методе переходных процессов.

По поводу процессов ВП, измеряемых установками с заземлёнными линиями, написано много. Большое число публикаций посвящено лабораторным измерениям магнитной вязкости на образцах. Однако всё ещё ощущается дефицит работ, в которых дается анализ и обобщение основных особенностей проявления ВП и МВ в методе переходных процессов. В данной статье мы постарались до некоторой степени восполнить этот пробел.

Индукционно–вызванная поляризация

Впервые вызванная электрическая поляризация горных пород наблюдалась К. Шлюмберже в 1911 г. С тех пор метод ВП нашел применение при решении задач рудной и нефтяной геологии, гидрогеологии, а в последние 25 лет – геоэкологии и геокриологии. Возбуждение и измерение процессов ВП осуществляется с помощью заземлённых линий, при этом воздействием на среду является ток в питающей линии, а откликом – разность потенциалов между приёмными электродами. При изучении вызванной поляризации во временной области в землю подается постоянный ток, который в некоторый момент

выключается, после чего производится измерение спадающего во времени напряжения – переходная характеристика ВП [4].

В методе переходных процессов при выключении установившегося тока в генераторной петле в окружающем пространстве индуцируется электрическое поле, под действием которого в земле возникают вихревые токи. Их распространение по вертикали и горизонтали контролируется распределением удельной электропроводности. В поляризующейся среде появляется «добавка» в виде поляризационных токов, известная как индукционно–вызванная поляризация, или ВПИ [5, 6]. Измерив магнитное поле устанавливающихся токов или скорость его изменения, можно в рамках принятой модели, например, Коул–Коул, оценить поляризационные параметры геологической среды.

Влияние вызванной поляризации на переходную характеристику проводящей и поляризующейся среды или объекта зависит от того, какие токи – вихревые или поляризационные – затухают быстрее. Если становление вихревых токов протекает медленнее, чем поляризационных, последние проявляются на фоне первых в виде небольшого возмущения. При обратном соотношении длительностей «нормального» и поляризационного переходных процессов вихревые токи затухают быстро, однако под действием первичного вихревого электрического поля успевает сформироваться система медленно затухающих поляризационных токов. После исчезновения вихревых токов поляризационные токи протекают в направлении, противоположном тому, которое имели вихревые токи. Таким образом, пространственное распределение поляризационных токов является как бы зеркальным отражением существовавшего на ранних временах распределения вихревых токов [8].

Отметим, что приведённое выше описание ВПИ как «добавки» поляризационных токов к вихревым отражает реальную картину, если среда является слабо поляризующейся. В общем же случае имеет место единый процесс становления вихревых токов, контролируемый распределением удельной электропроводности, которая зависит от частоты/времени. При этом

сохраняется фундаментальное свойство зондирований методом переходных процессов: чем больше временная задержка, на которой производится измерение ЭДС переходного процесса, тем больше эффективная глубина зондирований. Именно поэтому существует принципиальная и практическая возможность с помощью индукционных зондирований изучать распределение поляризуемости и других параметров (например, постоянной времени и показателя степени, если используется модель Коул–Коул) по глубине.

Иногда вызывают удивление случаи, когда при проведении съёмок методом ВП с заземлёнными линиями наблюдаются значительные аномалии поляризуемости, а проявления ВПИ отсутствуют, или же аномалии ВП и ВПИ не коррелируют. На наш взгляд, это объясняется тем, что физика ВПИ отличается от той, на которой основан метод ВП.

Ещё раз напомним, что в традиционном методе ВП воздействие на среду осуществляется с помощью источника тока, а откликом является напряжение $U_{ВП}(t)$ между электродами приёмной линии. При фиксированной поляризуемости напряжение $U_{ВП}(t)$ тем больше, чем выше удельное электрическое сопротивление геологической среды или объекта. В индуктивных методах воздействием является электрическое поле, а откликом – плотность тока поляризации $j_{ВП}(t)$, или – в терминах теории цепей – напряжение и ток [7]. Поэтому, чем ниже, при одной и той же поляризуемости, сопротивление среды / объекта, тем больше поляризационный ток.

Другая особенность физики ВПИ заключается в том, что интенсивность проявления индукционно вызванной поляризации определяется конкуренцией, или балансом, между индукционными и поляризационными процессами. Этот баланс сдвигается в ту или иную сторону при изменении (иногда незначительном) размеров установки, мощности и/или УЭС поляризующегося слоя, а также параметров поляризации [2]. По сравнению с традиционным методом ВП проявления вызванной поляризации в методе переходных процессов зависят от большего числа факторов.

Магнитная вязкость

Магнитная вязкость, или магнитное последствие, является одним из фундаментальных свойств ферромагнитных материалов. Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферромагнетиков (намагниченности, магнитной проницаемости и др.) по отношению к изменениям напряжённости внешнего магнитного поля. В горных породах проявления магнитной вязкости связаны преимущественно с установлением и релаксацией намагниченности суперпарамагнитных (СПМ) частиц ферромагнитных минералов.

Предположим, что поблизости от генераторной петли находится магнитный объект, который приобретает намагниченность под действием первичного магнитного поля генераторной петли. Если это вязкая намагниченность, при выключении первичного магнитного поля она убывает не сразу, а постепенно. Соответственно, постепенно убывает создаваемое объектом вторичное магнитное поле, которое индуцирует в приёмной петле или рамке медленно убывающую ЭДС.

В отличие от ВПИ в случае магнитной вязкости выполняется принцип суперпозиции: результирующий сигнал в приёмной петле представляет сумму ЭДС $e_1(t)$ и $e_2(t)$, индуцируемых, соответственно, релаксацией намагниченности и вихревых токов [1, 3]. ЭДС $e_1(t)$ спадает обратно пропорционально первой степени времени. ЭДС $e_2(t)$ убывает намного быстрее. Так, для однородного проводящего полупространства $e_2(t) \propto t^{-5/2}$. Поэтому с течением времени относительный вклад $e_1(t)$ в суммарный сигнал неуклонно возрастает. Начиная с некоторого момента, влияние релаксации намагниченности на результирующую переходную характеристику становится преобладающим. Этот момент зависит от пространственного распределения удельной электропроводности и суперпарамагнитных частиц, а также от размеров генераторно–приёмной установки. При прочих равных условиях он наступает тем позже, чем больше размер (разнос) генераторно–приёмной установки.

В индуктивной электроразведке влияние магнитной вязкости учитывается путём использования магнитной восприимчивости, которая зависит от времени или частоты [1,3].

Приобретение и спад вязкой намагниченности является откликом геологической среды на включение и, соответственно, выключение первичного магнитного поля и в отличие от ВПИ не связаны с диффузией вихревых токов. Какие именно области в нижнем полупространстве создают наибольший вклад в ЭДС $e_1(t)$ определяется – наряду с распределением СПМ частиц – размерами и формой генераторной петли, а также размером приёмной петли и её положением относительно генераторной. В отличие от ВПИ при изучении магнитной вязкости глубина исследований контролируется геометрией установки, а не временем, которое прошло с момента выключения тока в петле. Поэтому индукционные переходные характеристики не содержат информацию о распределении магнитной восприимчивости по глубине. Очевидно, для изучения пространственного распределения магнитной вязкости необходима постановка геометрических зондирований.

Как отмечалось выше, в случае проявлений магнитной вязкости результирующий сигнал представляет собой сумму вкладов, возникающих за счет релаксации намагниченности, $e_1(t)$, и затухания вихревых токов, $e_2(t)$. На поздних временах $e_1(t)$ на несколько порядков превышает $e_2(t)$. Поскольку результаты измерений всегда содержат ошибки, едва ли возможно с приемлемой погрешностью выделить слабый сигнал $e_2(t)$ на фоне намного большего $e_1(t)$. Поэтому в районах, где распространены магнитовязкие породы, особенно если они выходят на поверхность, возможности зондирований методом переходных процессов при изучении глубоко залегающих горизонтов ограничены.

Проблему усугубляют геологические помехи, источником которых является неравномерное распределение суперпарамагнитных частиц в верхней части разреза. Если вблизи приёмной петли располагается магнитовязкий объект ограниченных размеров (неоднородность), то в приёмной петле индуцируется

ЭДС $e_1(t)$, уровень которой может быть значительным вследствие близости приемной петли к объекту. Эта ЭДС убывает медленно, поэтому по истечении некоторого времени она оказывается намного больше по сравнению с создаваемой вихревыми токами, что препятствует изучению распределения электропроводности на большой глубине. Этот случай отличается от того, когда верхняя часть разреза содержит неоднородности в виде небольших объектов повышенной электропроводности. Несмотря на высокую электропроводность вследствие малых размеров объекта индуцированные в нем вихревые токи быстро затухают и не создают помех при изучении распределения электропроводности на больших глубинах.

Выводы

Индукционно–вызванная поляризация представляет собой отклик поляризующейся среды на воздействие в виде вихревого электрического поля, становление которого контролируется распределением удельной электропроводности. Таким образом, измерив индукционные переходные характеристики, можно определить распределение поляризуемости по глубине.

Хотя вызванная поляризация оказывает влияние на результаты как метода ВП, так и переходных процессов, в этих методах она проявляется по–разному. Поэтому корреляция между результатами методов ВП и переходных процессов зачастую оказывается ниже ожидаемой.

Процессы становления вихревых токов и релаксации намагниченности протекают независимо, поэтому индукционные переходные характеристики не содержат информации о распределении магнитной вязкости по глубине. Для того, чтобы найти это распределение, необходимы геометрические зондирования.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331–2019–0007 «Геоэлектрика в исследованиях геологической среды: технологии, полевой эксперимент и численные модели».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников Н. О., Антонов Е. Ю. Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. – 2008. – т. 49. – №3. – С. 262 – 276.
2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. – 2009. – т. 31. – №4. – С. 104–118.
3. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Метод переходных процессов при изучении геологических сред с магнитной вязкостью // Геофизический журнал. – 2012. – т. 34. – №4. – С. 137–149.
4. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л.: Недра, 1980. – 391 с.
5. Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка. – М.: Недра, 1985. – 192 с.
6. Flis M. F., Newman G. A., Hohmann G.W., Induced polarization effects in time-domain electromagnetic measurements // Geophysics. – 1989. – Vol. 54. – P. 514–523.
7. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Current and voltage source induced polarization transients: a comparative consideration // Geophysical Prospecting. – 2018. – Vol. 66. – P. 422–431.
8. Smith, R.S., Walker, P.W., Polzer, B.D., and West, G.F. The time-domain electromagnetic response of polarizable bodies: an approximate convolution algorithm // Geophysical Prospecting. – 1988. – Vol. 36. – P. 772 – 785.

REFERENCES

1. Kozhevnikov N. O., Antonov E. Yu. Vliyanie relaksaczii namagnichennosti odnorodnogo poluprostranstva na indukcionny`e perekhodny`e kharakteristiki // Geologiya i geofizika. – 2008. – t. 49. – №3. – S. 262 – 276.
2. Kozhevnikov N. O., Antonov E. Yu. Impul`snyaya induktivnaya e`lektrozvedka polyarizuyushhikhsya sred // Geofizicheskij zhurnal. – 2009. – t. 31. – №4, S. 104–118.
3. Kozhevnikov N. O., Antonov E. Yu. Metod perekhodny`kh processov pri izuchenii geologicheskikh sred s magnitnoj vyazkost`yu // Geofizicheskij zhurnal. – 2012. – t. 34. – №4. – S. 137–149.
4. Komarov V. A. E`lektrozvedka metodom vy`zvannoj polyarizaczii. – L.: Nedra, 1980. – 391 s.
5. Sidorov V. A. Impul`snyaya induktivnaya e`lektrozvedka. – M.: Nedra, 1985. – 192 s.
6. Flis M. F., Newman G. A., Hohmann G.W., Induced polarization effects in time-domain electromagnetic measurements // Geophysics. – 1989. – v. 54. – P. 514–523.
7. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. Current and voltage source induced polarization transients: a comparative consideration // Geophysical Prospecting. – 2018. – Vol. 66. – P. 422–431.
8. Smith, R.S., Walker, P.W., Polzer, B.D., and West, G.F. The time-domain electromagnetic response of polarizable bodies: an approximate convolution algorithm // Geophysical Prospecting. – 1988. – Vol. 36. – P. 772 – 785.

© Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов 2020