

МОРСКАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Пушкарев П.Ю.¹

*¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы 1,
e-mail: pavel_pushkarev@list.ru*

Реферат

Электромагнитные методы геофизики применяются в морях и океанах при поиске и разведке месторождений нефти и газа. Искусственные поля применяются в методе зондирования становлением поля (ЗС) и в методе дистанционного (или дипольного) электромагнитного зондирования (ДЭМЗ) гармоническим полем. При этом применяются буксируемые источники (питающие линии), а измерения электрического поля выполняются с помощью буксируемых кос или донных станций. Компоненты естественного поля, электрические и магнитные, измеряются с помощью донных станций в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ). На мелководном шельфе, в том числе в России, чаще применяются модификации метода ЗС с буксируемыми установками. При глубине моря в сотни метров и километры используются технологии ДЭМЗ и МТЗ, в основном разработанные за рубежом. В данной работе мы подробно представляем метод морских ЗС. Рассмотрены аппаратно-методические комплексы, особенности интерпретации данных, преимущества и недостатки метода морских ЗС.

Ключевые слова: морская электроразведка; электромагнитные зондирования; нефтегазовые исследования.

MARINE ELECTROMAGNETIC PROSPECTING

Pushkarev P.Yu.¹

*¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskie gory 1,
e-mail: pavel_pushkarev@list.ru*

Abstract

Electromagnetic geophysical methods are used in the seas and oceans for oil and gas exploration. Controlled sources are used in time-domain electromagnetic sounding method (TEM) and in dipole electromagnetic sounding method (DEMS). In this case, towed sources (transmitting lines) are used, and electric field measurements are performed using towed streamers or bottom stations. The natural field components, electrical and magnetic, are measured using bottom stations in the magnetotelluric sounding (MT) method. On the shallow shelf, including in Russia, modifications of the TEM method with towed streamers are more often used. With a sea depth of hundreds of meters and kilometers, DEMS and MT technologies, mainly developed abroad, are applied. In this paper, we present in detail the marine TEM method. Observation techniques, questions of data interpretation, advantages and disadvantages of the marine TEM method are considered.

Keywords: marine electroprospecting; electromagnetic soundings; hydrocarbon exploration.

Введение

Первыми «морскими электроразведчиками» миллионы лет назад были электрические рыбы. Поскольку рыбы обитают в водной электропроводящей среде, у некоторых из них развились электрические органы, позволяющие создавать и чувствовать электрические поля. «Рыба создаёт в воде электрическое поле, напоминающее поле диполя. Объект, электропроводность которого отличается от электропроводности воды, искажает силовые линии поля, и рыба чувствует искажение» [*Ольшанский, 2005*].

В развитие морской электроразведки внесли вклад многие отечественные и зарубежные геофизики, но хотелось бы особенно отметить Леонида Львовича Ваньяна (1932–2001), которому сейчас (в 2022 году) исполняется 90 лет. Он долгие годы заведовал лабораторией геофизических полей Института океанологии АН СССР / РАН (1974–2001). Фундаментальное значение имела его монография «Глубинная электропроводность океанов и континентов» [*Ваньян и Шиловский, 1983*]. Среди многих его работ, здесь следует выделить разработку донной аппаратуры и первые ЭМ зондирования в Средиземном море. Он также внёс большой вклад в развитие интерпретации донных ЭМ зондирований. Помимо научной работы, Леонид Львович активно преподавал в вузах, был одним из организаторов Всесоюзных школ-семинаров по ЭМ зондированиям Земли.

Можно выделить три группы задач морских исследований с использованием электромагнитных (ЭМ) полей:

- Изыскания под строительство, обследование техногенных объектов на шельфе (малоглубинная геофизика);
- Региональный прогноз, поиск и разведка месторождений нефти и газа, а также изучение газогидратов и многолетней мерзлоты на шельфе (морская электроразведка);
- Изучение глубоких горизонтов земной коры и верхней мантии морей и океанов (глубинная электроразведка).

Здесь мы будем касаться только второй группы задач, решаемых морской электроразведкой.

Основными методами морской нефтегазовой электроразведки являются методы низкочастотного ЭМ зондирования. Их можно разделить на использующие искусственные и естественное поля:

- Искусственное импульсное поле – метод зондирования становлением ЭМ поля (ЗС), time-domain EM method (TEM);
- Искусственное гармоническое поле – метод дистанционного (или дипольного) ЭМ зондирования (ДЭМЗ), controlled-source EM method (CSEM);
- Естественное поле, называемое магнитотеллурическим (МТ) – метод МТ зондирования (МТЗ), magnetotelluric method, МТ.

Далее мы ограничимся подробным рассмотрением морских зондирований методом ЗС.

Метод ЗС может применяться в дальней зоне источника (ЗСД), но чаще реализуется в ближней зоне (ЗСБ), когда используется небольшой размер установки, что удобно технологически и упрощает интерпретацию данных. На суше метод широко используется в индукционном двухпетлевом варианте, но на море, как правило, применяется гальваническое возбуждение с помощью питающей линии и регистрация электрического поля. Такая технология эффективна и для изучения вызванной поляризации (ВП). При этом ВП часто рассматривается как частотная дисперсия электропроводности и описывается с помощью эмпирических формул, таких как формула Коул-Коул [Cole & Cole, 1941; Tarasov & Titov, 2013]. В качестве модификации метода ЗС можно рассматривать дифференциально-нормированный метод электроразведки (ДНМЭ), позволяющий в определённой степени разделять процесс становления ЭМ поля и спад ВП [Рыхлинский и др., 1991].

Аппаратурно-методические комплексы для морских ЗС

В нашей стране и за рубежом было создано несколько аппаратурно-методических комплексов (АМК) для морских ЗС. Как правило, каждая научно-производственная организация, применяющая морские ЗС, формирует свой АМК. Он включает генератор и измеритель, косы с питающими и приёмными электродами, программное обеспечение (ПО) для регистрации и анализа данных. Для каждого АМК существуют требования к техническим характеристикам судна, к технологии наблюдений. Обычно используется питающая линия АВ, буксируемая за судном. Одна или несколько приёмных линий MN могут буксироваться за судном (поверхностные или заглубленные) или лежать на дне.

Электроразведочный АМК предприятия «Севморгео» (Санкт-Петербург) для поиска и оконтуривания нефтегазовых залежей при глубине моря до 50 м «АМЭК» разрабатывался с конца 1970-х годов [Вишняков и др., 1983; Петров, 2000]. Применялась поверхностная линия АВ длиной до 1–2 км с силой тока до 1000 А и поверхностные или донные линии MN. Это позволяло получать информацию о сопротивлении горных пород до глубины порядка 5 км и о поляризуемости до 1 км.

Дальнейшие работы этого научного коллектива проводились в рамках компании ЕММЕТ (Санкт-Петербург) при поддержке компании Fugro (Нидерланды). Акцент был сделан на донные измерения, обеспечивающие близкое расположение к изучаемым объектам и исключение помех, связанных с движением приёмных линий в воде. Для мелководья была разработана технология работ в транзитной зоне с донными косами, успешно применённая, в частности, на Каспийском море [Петров и др., 2010]. Для работ при большой глубине моря была создана и успешно применена в Чёрном море технология работ с донными станциями [Бобров и др., 2013]. Обработка и интерпретация данных проводилась как во временной, так и в частотной области.

После 2014 года исследования были продолжены в компании МЕМ (Санкт-Петербург). Помимо донных измерений, велась и разработка буксируемой системы. Была предложена длинная (наращиваемая до 9–12 км) секционная линия, с расстояниями между приёмными электродами 500 м и 4-канальными автономными модулями для регистрации сигналов [Тулупов и др., 2015]. В качестве источника рассматривалась генераторная линия длиной 500–1000 м с током силой до 1000 А в виде двухполярных импульсов с паузами. С установкой с таким диапазоном разносов данные можно обрабатывать и интерпретировать как в режиме ЗС, так и дистанционного зондирования гармоническим полем.

Вторым центром развития морской электроразведки методом ЗС в нашей стране было предприятие «Южморнефтегеофизика» (Геленджик). В 1980-е годы использовалась плавающая установка с питающей линией АВ 500 м и двумя приёмными линиями, одна – в центре АВ (установка Шлюмберже), вторая – позади АВ (дипольная установка) [Небрат, 1990]. Это позволяло комбинировать профилирование на постоянном токе с измерением ЗС с помощью дипольной установки. Кроме того, наблюдения могли проводиться с одного судна вместе с сейсморазведкой, при этом обеспечивалось согласование источников по времени, чтобы сейсмический и электрический работали поочередно. Ток силой до 300 А вырабатывала небольшая генераторная станция, для регистрации поля была адаптирована популярная станция ЦЭС-2.

Далее развитие технологии проводилось в рамках компании Солитон (Геленджик). Также применялась буксируемая кабельная система, реализующая симметричную и дипольную установку с различными длинами линий. Позднее для создания импульсов тока применялись бензогенератор и портативный выпрямитель, для регистрации – двухканальная электроразведочная станция ТЕЛСС-3-Э производства компании «Геосигнал», управляемая с внешнего компьютера. Исследования проводились в разных морях и при разной глубине моря. На этапе обработки и интерпретации данных применялась методика выделения высокочастотной составляющей сигнала (см. ниже).

С начала 2000-х годов разработка морской многоэлектродной системы, реализующей метод ДНМЭ (ранее применявшийся на суше), велась в компании СГНПК (Иркутск) [Легейдо и др., 1996; Ситников и др., 2019]. Для ДНМЭ необходима многоэлектродная приёмная коса, был разработан её вариант длиной около 2000 м. Возможно её заглубление до 500 м, при этом источником является наклонная линия АВ. Для измерений применяется специализированный многоканальный прибор ИРПГ, разработанный компаниями «СГНПК» и «Сибгеосистемы».

С начала 2010-х годов для применения на Арктическом шельфе, в том числе для картирования многолетней мерзлоты, разрабатывается АМК компании «МГУ-Геофизика» (Москва) [Кошурников, 2020].

Применяются плавучие питающая и приёмная линии длиной по 200 м и более. Источником обычно служит корабельный генератор, подключаемый через трансформатор к коммутатору тока, для измерений применяется станция ТЕЛСС-3-Э компании «Геосигнал».

За рубежом технологии морских ЗС активно развивались в Университете Торонто (Канада). АМК разрабатывался для изучения газогидратов на глубинах до 100 м, но при глубине моря до 1000 м и более [Edwards, 1997; Schwalenberg et al., 2005]. Использовалась донная буксируемая генераторно-измерительная установка с несколькими приёмными линиями на разносах от 150 до 400 м. Применялись токи до 50 А, неполяризующиеся AgCl электроды, автономные регистраторы данных. Отметим, что ранее в Университете Торонто также разрабатывалась экспериментальная система с горизонтальными магнитными диполями, но она не получила широкого применения [Cheesman et al., 1990].

Компания KMS (США-Германия) развивает технологию tCSEM во временной области [Strack, 2010]. Методы обработки и интерпретации опробовались на данных, полученных с гармоническим источником и донными станциями. Далее для проведения наблюдений был разработан собственный генератор KMS 500, обеспечивающий ток до 70 А, и 6-канальные измерители KMS-850. Предложено использовать буксируемую питающую линию и густую сеть наблюдений электрического и магнитного полей.

АМК, который разрабатывался компанией Petromarker, а затем был передан компании Allton (обе – Норвегия) основан на использовании вертикальных линий АВ и MN [Holten et al., 2009]. В этом случае повышается чувствительность к высокоомным объектам, к которым относятся залежи углеводородов. Верхний электрод питающей линии при этом находится в воде рядом с судном, а нижний – под ним на дне. Измерения выполняются с помощью донных станций с треногами, поддерживающими вертикальную приёмную линию. В ходе работ используется массив донных станций и множество положений источника. Работы по этой технологии велись в Норвежском море [Eide & Carter, 2020].

Другой технологией, использующей вертикальные токи, является зондирование вертикальными токами (ЗВТ), разработанная в ИНГГ СО РАН. При этом такая токовая система формируется с помощью кругового электрического диполя (КЭД). Технология применялась на суше, но авторами также было высказано предложение выполнить зондирование с дрейфующего льда в Арктике [Могилатов и Злобинский, 2016].

Особенности интерпретации данных морских ЗС

Одномерное (1D) моделирование ЗС на шельфе показывает, что даже для установки с горизонтальными линиями АВ и MN за счёт гальванической составляющей чувствительность к высокоомным слоям высока [Пушкарев, 2017]. Так, при мощности 25 метров, высокоомный

(100 Ом·м) слой хорошо проявляется на кривых ЗС при глубине залегания до примерно 1500 м. Поляризующийся (2%) 25-метровый слой ярко проявляется при залегании на глубине до 150 м, что благоприятствует выявлению аномалий ВП в зоне вторичных изменений над залежами углеводородов.

Трёхмерное (3D) моделирование ЗС на шельфе с использованием вертикальных питающей и приёмной линий подтвердило весьма высокую чувствительность такой установки и к локальным трёхмерным объектам [Barsukov & Fainberg, 2017].

Интерпретация кривых ЗС (решение обратной задачи) часто выполняется в рамках 1D модели. Это связано с, как правило, пологим залеганием изучаемых осадочных толщ на шельфе, а также с небольшим размером установки, в пределах которого среда слабо меняется. Кроме того, при морских работах получаются большие объёмы данных, что требует при 3D инверсии очень больших вычислительных ресурсов.

Помимо сопровитлений слоёв, при 1D интерпретации могут оцениваться и их поляризационные параметры, например, входящие в формулу Коул-Коул. Чтобы обеспечить устойчивость обратной задачи, число определяемых параметров ограничивают и оценивают поляризационные параметры лишь отдельных слоёв, которые предполагаются поляризующимися. Следует отметить, что связь глубины залегания поляризующегося слоя и времени становления поля, на котором он проявляется, не проста и зависит от длительности процесса ВП.

В отличие от классических зондирований ЗС, в которых используется сигнал в одной приёмной линии, особенностью интерпретации данных ДНМЭ является то, что в каждой точке используются комбинированные сигналы, определяемые по совокупности сигналов в соседних приёмных линиях [Davydycheva et al., 2006]. Как отмечалось выше, при этом достигается определённое разделение становления ЭМ поля и поляризационной составляющей, что предоставляет дополнительные возможности для анализа этих процессов. С точки зрения решения обратной задачи, в ДНМЭ формируется несколько иной функционал невязки, чем при традиционном подходе.

Кардинально другой подход к обработке и интерпретации данных рассмотрен в работах [Небрат, 1990; Небрат и Сочельников, 2011]. Он сводится к выделению высокочастотных осциллирующей сигнала, в ходе чего удаляется плавная составляющая, используемая в классическом ЗС. Далее строятся временные разрезы и проводится их интерпретации по аналогии с сейсмическими разрезами. Этот подход не имеет общепризнанного теоретического обоснования и работает только в руках авторов.

Преимущества и недостатки морских ЗС

Подведём итоги и оценим преимущества и недостатки метода морских ЗС. За счёт использования гальванической составляющей, метод имеет более высокую чувствительность к высокоомным объектам, чем методы с индукционным возбуждением. С другой стороны, высокоомные слои могут экранировать нижележащие толщи. Использование мощного источника и накопления сигнала обеспечивает сравнительно высокую точность наблюдений, но мощность этого источника ограничивает глубинность исследования. Буксируемые установки, широко используемые в ЗС, обеспечивают высокую производительность наблюдений, однако при движении приёмных линий возникают специфические помехи. Небольшой размер установки обеспечивает чувствительность к разрезу под точкой наблюдения, что благоприятствует применению 1D интерпретации, хотя при изучении ограниченных по площади объектов она может давать существенные искажения. Наконец, технология морских ЗС позволяет изучать ВП во временной области, что способствует использованию поляризационных характеристик в большей степени, чем в других методах морской электроразведки.

Литература

- Бобров Н.Ю., Кочеров А.Б., Маловичко М.С., Петров А.А., Сергеев М.Б. Морские электромагнитные зондирования с донными станциями на шельфе Чёрного моря. Геофизика, 2013, №4. С. 2-9.
- Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. М.: Наука, 1983, 88 с.
- Вишняков А.Э., Паняев В.П., Яневич М.Ю., Богородский М.М. Методика, технология и аппаратура морских электроразведочных работ при прямых поисках нефти и газа. В книге «Аппаратура для исследования геомагнитного поля». М.: ИЗМИРАН, 1983. С. 110-117.
- Кошуриков А.В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на Арктическом шельфе России. Вестник МГУ, Серия Геология, 2020, №3, С. 116-125.
- Легайдо П.Ю. Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированные методы геоэлектроразведки. Иркутск, Изд-во «Бук», 1996. 145 с.
- Могилатов В.С., Злобинский А.В. Геоэлектрический эксперимент в Арктике (проект). Геофизика, 2016, №1, С. 75-80.
- Небрат А.Г. Интерпретация данных ЗСБ в морских условиях. Диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. М., 1990. 107 с.
- Небрат А.Г., Сочельников В.В. Опыт высококоразрезающей электроразведки. Геофизический журнал, 2011, №1. С. 147-153.
- Ольшанский В.М. Электрический глаз во всё тело. Наука и жизнь, 2005, №11.
- Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах. Геофизика, 2000, №5. С. 21-26.
- Петров А.А., Маловичко М.С., Кочеров А.Б., Лисицын Е.Д. Опыт применения электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря. Геофизика, 2010, №2. С. 60-64.
- Пушкарев П.Ю. Интерпретация низкочастотных электромагнитных зондирований неоднородных сред применительно к решению геологических задач. Диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. М.: МГУ, 2017., 167 с.

Рыхлинский Н.И., Бубнов В.П., Кашик А.С. Дифференциально-нормированный метод электроразведки для обнаружения и оконтуривания залежей углеводородов. М: ВНИИОЭНГ, 1991, 20 с.

Ситников А.А., Иванов С.А., Жуган П.П., Агеенков Е.В. Аквальная съёмка дифференциально-нормированным методом электроразведки (АДНМЭ) и непрерывные дипольные электромагнитные зондирования (НДЭМЗ) для нефтегазопроисковых и инженерно-геологических работ. Материалы конференции EAGE «Морские технологии 2019», Геленджик, 2019. 11 с.

Тулупов А.В., Кяспер В.Э., Лисицын Е.Д., Петров А.А., Лобковский Л.И., Рогинский К.А. Перспективы морской электроразведки при поисках углеводородов. Приборы и системы разведочной геофизики, 2015, №2. С. 19-29.

Barsukov P.O., Fainberg E.B. Marine transient electromagnetic sounding of deep buried hydrocarbon reservoirs: principles, methodologies and limitations. Geophysical Prospecting, 2017, Vol. 65., No. 3, p. 840-858.

Cheesman S.J., Edwards R.N., Law L.K. A test of a short-baseline sea-floor transient electromagnetic system. Geophysical Journal International, 1990, 103, p. 431-437.

Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. Journal of Chemical Physics, 1941, 6, p. 42-52.

Davydycheva S., Rykhlini N., Legeido P. Electrical-prospecting method for hydrocarbon search using the induced-polarization effect. Geophysics, 2006, Vol. 71, No. 4. p. 179-189.

Edwards R.N. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using sea-floor transient electric dipole-dipole methods. Geophysics, 1997, No. 1. p. 63-74.

Eide K., Carter S. Introduction to CSEM. First Break, 2020 (November), Vol. 38. p. 63-68.

Holten T., Flekkoy E.G., Singer B., Blixt E.M., Hanssen A., Maloy K.J. Vertical source, vertical receiver, electromagnetic technique for offshore hydrocarbon exploration. First Break, 2009 (May), Vol. 27, p. 89-93.

Schwalenberg K., Scholl C., Mir R., Edwards R.N., Willoughby E.C. Gas hydrate assessment using a marine bottom-towed controlled source electromagnetic system: latest results from Cascadia. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, 2005. p. 350-359.

Strack K.M. Marine time domain electromagnetics. 8th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad, 2010. 4 p.

Tarasov A., Titov K. On the use of the Cole-Cole equations in spectral induced polarization. Geophysical Journal International, 2013, Vol. 195, Issue 1, p. 352-256.