

ПРИМЕНЕНИЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И НЕИТЕРАЦИОННОЙ ЭКСПРЕСС-ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Артём Русланович Леоненко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, инженер, тел. (383)330-45-05, e-mail: Leonenkoart@gmail.com

Кирилл Николаевич Даниловский

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, инженер 1 категории отдела геолого-экономического анализа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

Алексей Михайлович Петров

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, геолог 1 категории отдела геологии Западной Сибири, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Работа посвящена развитию методико-алгоритмического обеспечения количественной интерпретации данных электрокаротажа нефтяных скважин. Рассматриваются результаты применения нейросетевого подхода к обработке данных электрокаротажа, измеренных на интервалах, сложенных маломощными контрастными по электрофизическим свойствам пластами. Предлагаемые алгоритмы сочетают в себе преимущества интерпретации данных на базе двумерной осесимметричной модели среды и быстрого действия, что позволяет использовать их на этапе первичной обработки, повышая достоверность оперативной интерпретации.

Ключевые слова: нефтяные коллекторы, геофизические исследования скважин, электрокаротаж, экспресс-инверсия, детальные геоэлектрические модели, машинное обучение, свёрточные нейронные сети

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR RESISTIVITY LOGS PROCESSING AND NON-ITERATIVE EXPRESS-INVERSION IN COMPLEX RESERVOIR ENVIRONMENTS

Kirill N. Danilovskiy

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny ave., engineer of the 1st category of the geological and economic analysis department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptuyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior researcher, tel. (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

Artem R. Leonenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia., Engineer, tel. (383)330-45-05, e-mail: Leonenkoart@gmail.com

Aleksei M. Petrov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, 630091, Russia, Novosibirsk, 67 Krasny ave., geologist of the 1st category of the Western Siberia geology department, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, tel. (383)330-45-05, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

The work is devoted to the development of techniques and software for the quantitative interpretation of resistivity oil well logs. The article considers the results of applying the neural network approach to the processing of resistivity logging data measured at intervals composed of thin layers with contrasting electrical properties. The proposed algorithms combine the advantages of data interpretation based on a two-dimensional axisymmetric medium model and high performance, which allows them to be used at the primary processing stage, increasing the reliability of express interpretation.

Keywords: oil reservoirs, well logging, resistivity logging, express-inversion, high-detailed geoelectric models, machine learning, convolutional neural networks

Введение

Стандартный подход к количественной интерпретации данных электрокаротажа основывается на итерационном подборе параметров модели среды с минимизацией невязки между измеренными и рассчитанными данными. Сложность исследуемых сегодня геологических объектов требует учета влияния на измерения вмещающих пород и скважинных условий. В субвертикальных скважинах учет этих факторов возможен за счет использования детальных двумерных геоэлектрических моделей среды. Однако такая постановка приводит к высокой вычислительной сложности алгоритмов численного моделирования каротажных сигналов. Таким образом, быстродействие является фактором, ограничивающим возможности стандартного подхода при исследовании сложнопостроенных отложений.

Перспективной альтернативой стандартному подходу могут стать алгоритмы на основе машинного обучения, показавшие себя эффективным средством решения широкого спектра задач, в том числе и геофизических [1, 2]. В работе предлагается нейросетевой подход к обработке данных электрокаротажа, измеренных на интервалах, сложенных маломощными контрастными по электрофизическим свойствам пластами. Возможности предлагаемого подхода демонстрируется на примере алгоритма экспресс-инверсии данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) в параметры детальной двумерной геоэлектрической модели и алгоритма учета влияния вмещающих пород на сигналы электромагнитных зондирований (ВИКИЗ/ВЭМКЗ).

Данные электрокаротажа для обучения обоих алгоритмов рассчитываются с применением алгоритмов численного моделирования комплекса AlondraWL [3]. В качестве базовой архитектуры, используемой для реализации

алгоритмов выбрана полносвёрточная искусственная нейронная сеть (ИНС). Архитектура ИНС включает набор блоков, состоящих из свёрточных слоев и слоев пакетной нормализации. Обучение осуществляется алгоритмом Nadam [4], представляющим собой модификацию алгоритма Adam с использованием импульса Нестерова.

Экспресс-инверсия данных БКЗ

Решение обратной задачи электрокаротажа в общем случае неединственно. Стандартный подход подразумевает возможность выбора из множества моделей той, которая наилучшим образом удовлетворяет априорной информации в рамках заданной параметризации. При применении ИНС напрямую к измеренным данным такой выбор невозможен, так как каждому набору входных данных ставится в соответствие лишь одна модель среды. Однако эта связь может быть настроена для получения моделей, адекватных геологической среде на конкретных месторождениях. Для такой настройки предлагается использовать специальным образом сформированные обучающие выборки пар “сигналы - модель среды”, обеспечивающие нахождение более регулярных решений в конкретных геоэлектрических условиях. Кроме того, часть априорной информации можно учесть за счет использования ее в явном виде во входных данных.

Входными данными для алгоритма неитерационной экспресс-инверсии данных БКЗ являются измеренные сигналы, данные резистивиметрии и кавернометрии, а также информация об интервалах залегания проницаемых отложений, так как для сигналов БКЗ характерна эквивалентность между влиянием радиального изменения УЭС и электрической анизотропии. Результатом работы алгоритма является геоэлектрическая модель среды. Интервалы непроницаемых пород на каждой глубине измерений характеризуются горизонтальным и вертикальным УЭС, интервалы проницаемых – УЭС неизменной части пласта, УЭС и шириной измененной фильтрацией бурового раствора зоны.

На рис. 1 приведены результаты применения алгоритма неитерационной экспресс-инверсии сигналов зондов БКЗ к практическим данным, измеренным на интервале терригенных меловых отложений Широкого Приобья. Результатом работы алгоритма является высокоразрешенная геоэлектрическая модель прискважинного пространства. На интервалах непроницаемых отложений восстанавливаются их горизонтальное и вертикальное УЭС, на интервалах проницаемых - параметры измененной фильтрацией зоны и неизменной части пласта в изотропном приближении.

Полученную модель можно верифицировать сравнением рассчитанных в ней сигналов с измеренными. В приведенном примере среднее значение относительной невязки сигналов $\delta_{БКЗ}$ на интервалах непроницаемых отложений составляет 3.5 %. Однако на интервале сложнопостроенного коллектора это значение увеличивается до 7.9 %, при этом, в некоторых точках по глубине невязка сигналов отдельных зондов превышает 20 %. Это может быть вызвано как неудовлетворительной работой алгоритма, так и особенностями измерений: в силу

отсутствия фокусировки тока в методе БКЗ, малому изменению параметров среды может соответствовать большое изменение сигналов, особенно при наличии в разрезе тонких высокоомных карбонатизированных прослоев.

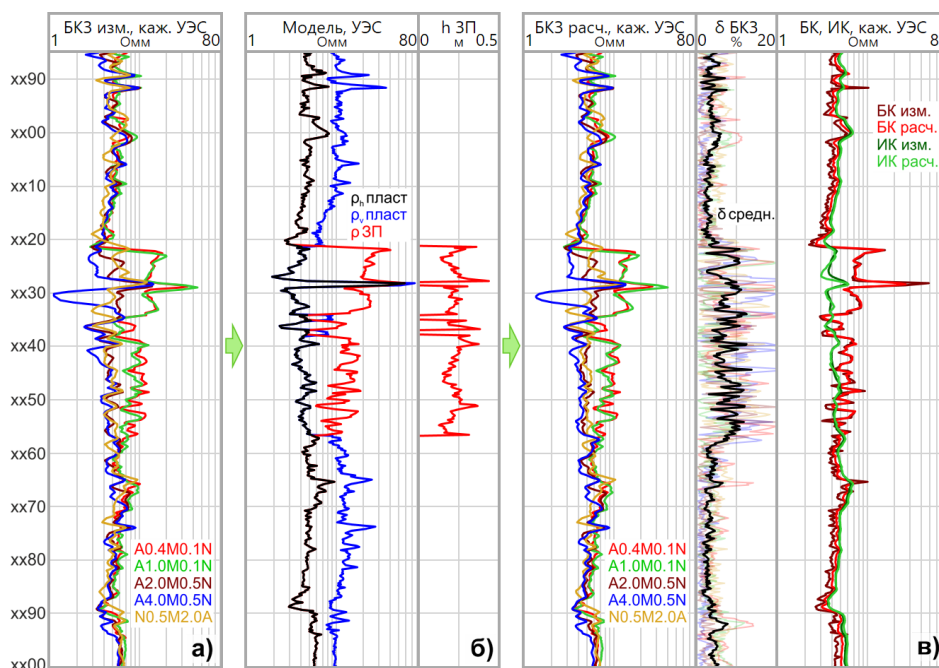


Рис. 1. а) Сигналы БКЗ, измеренные на интервале терригенных меловых отложений Широного Приобья, б) геоэлектрическая модель, полученная их инверсией, в) измеренные и рассчитанные в полученной модели сигналы БКЗ, БК и ИК

Поэтому для оценки качества модели предлагается использовать данные низкочастотного индукционного (ИК) и фокусированного бокового (БК) каротажей. Рассчитанные в полученной модели и практические сигналы этих методов хорошо согласуются, что говорит о высокой достоверности результатов. При этом, полученное распределение горизонтального УЭС характеризуется высокой вертикальной разрешенностью, сопоставимой с измерениями БК.

Учет влияния вмещающих пород на сигналы ВЭМКЗ

Применение подхода в такой же постановке для методов, сигналы которых зависят от большего количества электрофизических характеристик, может быть затруднительно. Одним из таких методов является ВЭМКЗ, сигналы которого чувствительны к параметрам не только зоны проникновения, но и окаймляющей зоны, а также подвержены влиянию диэлектрической поляризации отложений. Тем не менее, возможно использование подхода в упрощенной постановке. Для этого в обучающей выборке каждому набору сигналов, рассчитанному в двумерной геоэлектрической модели, ставятся в соответствие не сами параметры модели, а сигналы, рассчитанные в ней в предположении, что вмещающие породы

не влияют на измерения напротив каждого конкретного пласта (“1D-сигналы”). Обученная на такой выборке ИНС устраняет из сигналов влияние вмещающих пород, что позволяет проводить интерпретацию на базе одномерной радиально-слоистой модели среды без ущерба достоверности результатов.

На рис. 2 представлен результат применения алгоритма коррекции влияния вмещающих пород к синтетическим сигналам ВИКИЗ, рассчитанным в модели среды, полученной путем численной двумерной инверсии практических данных. При таком способе оценки качества работы алгоритма на вход подаются сигналы, максимально приближенные к практическим. Также известны все параметры модели среды, что позволяет напрямую сравнить результаты коррекции с истинными 1D-сигналами.

Как видно из данных, представленных на рисунке, алгоритму удается с практически значимой точностью восстановить распределение 1D-сигналов в достаточно сложной модели, сложенной переслаиванием проницаемых и непроницаемых пластов разной мощности. Вид получаемых диаграмм позволяет значительно упростить процедуру расчленения разреза на отдельные пласты, что является важным этапом интерпретации. Следует отметить, что в реальности распределение электрофизических свойств может быть далеко от кусочно-постоянного, а выделение пластов в разрезах, сложенных переслаиванием тонких контрастных по УЭС отложений неоднозначно. Наличие в разрезе большого их количества может нарушать работу алгоритма. В настоящее время исследуются возможные решения, среди которых предобработка входных данных как на этапе обучения ИНС, так и на этапе применения алгоритма.

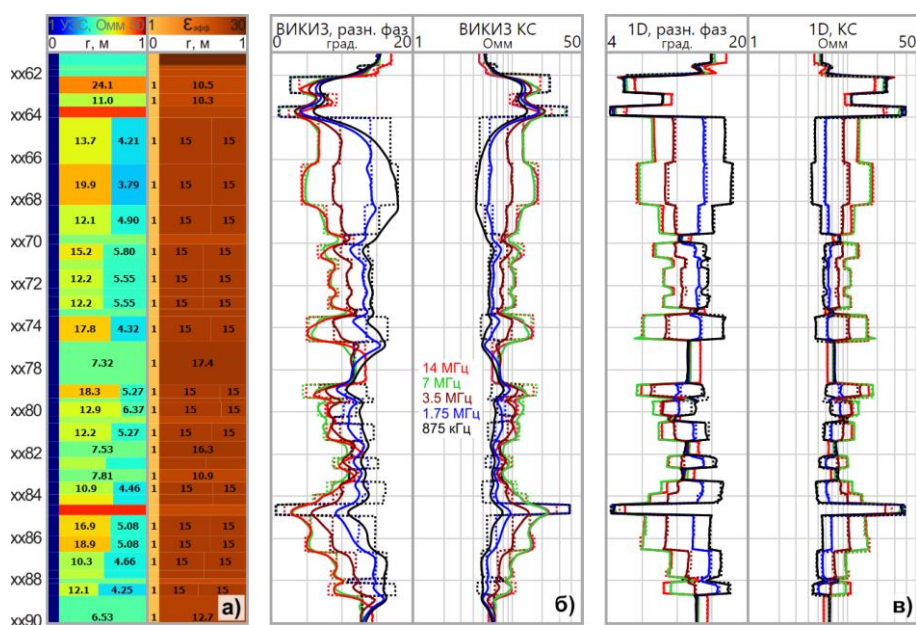


Рис. 2. а) геоэлектрическая модель, полученная двумерной инверсией практических данных, б) рассчитанные в модели сигналы ВИКИЗ (сплошные линии) и соответствующие им 1D-сигналы (пунктир), в) результаты обработки синтетических сигналов алгоритмом (сплошные линии) и истинные 1D-сигналы (пунктир)

Заключение

На примере реализованных алгоритмов экспресс-инверсии данных БКЗ и учета влияния вмещающих пород на сигналы ВЭМКЗ продемонстрированы возможности нового подхода к обработке данных электрокаротажа на основе свёрточных ИНС. Разработанные алгоритмы ориентированы на исследование сложнопостроенных проницаемых отложений и сочетают в себе преимущества интерпретации данных на базе двумерной осесимметричной модели среды с быстродействием и низкой ресурсоемкостью. Это позволит использовать их на этапе первичной обработки, повышая достоверность оперативной интерпретации и упрощая проверку кондиционности измеренных данных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного Проекта № 20-45-543003 «Методико-алгоритмическое обеспечение количественной интерпретации данных электрокаротажа нефтяных скважин на основе технологий машинного обучения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логинов Г.Н., Петров А.М. Автоматическое выделение геоэлектрических границ по данным бокового каротажного зондирования с помощью глубокой сверточной нейронной сети // Геология и геофизика. – 2019. – т. 60. – № 11. – С. 1650-1657.
2. Danilovskiy K., Loginov G., Nechaev O. Automatic geoelectric boundaries detection on the resistivity images based on 3D numerical simulation and convolutional neural network // The 9th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Saint Petersburg, 16-19 November 2020. – 2020. – P. 15.
3. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // ГЕО-Сибирь-2018. Т. 4. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. материалов XIV Международного научного конгресса, Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г. – 2018. – С. 90-98.
4. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam [Электронный ресурс] URL: http://cs229.stanford.edu/proj2015/054_report.pdf

REFERENCES

1. Loginov G.N., Petrov A.M. Avtomaticheskoe vydelenie geoelektricheskikh granic po dannym bokovogo karotazhnogo zondirovaniya s pomoshch'yu glubokoj svertochnoj nejronnoj seti // Geologiya i geofizika. – 2019. – t. 60. – № 11. – S. 1650-1657.
2. Danilovskiy K., Loginov G., Nechaev O. Automatic geoelectric boundaries detection on the resistivity images based on 3D numerical simulation and convolutional neural network // The 9th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Saint Petersburg, 16-19 November 2020. – 2020. – P. 15.
3. Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V. Bystraya sovместnaya dvumernaya inversiya dannyh elektromagnitnyh i gal'vanicheskikh karotazhnyh zondirovanij s opredeleniem vertikal'nogo soprotivleniya // GEO-Sibir'-2018. T. 4. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Ekonomika.

Geokologiya: sb. materialov XIV Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, Novosibirsk, 23-27 aprelya 2018 g. – 2018. – S. 90-98.

4. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam [Jelektronnyj resurs] URL: http://cs229.stanford.edu/proj2015/054_report.pdf.

© *К. Н. Даниловский, А. Р. Леоненко, А. М. Петров, 2021*