

ГЕОФИЗИКА, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 550.34

Анализ каротажных данных, полученных при бурении нефтяной скважины, и исследование возможности применения волоконно-оптических датчиков

П.Р. Ширяев, Г.А. Цветков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Пермь, Комсомольский пр., 29

E-mail: prshir@yandex.ru, zvetkov71043@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 12 января 2016 г.)

Обработаны данные, полученные при каротаже во время бурения скважины. Проведена их визуализация и построена корреляционная матрица. Выявлены переменные, между которыми существует корреляция. Построена линейная регрессия и оценен коэффициент детерминации. В ходе исследования установлено, что данные по дальнему, среднему и ближнему электромагнитному каротажу коррелируют, но тем не менее дают разные результаты. Отмечено, что разница в показаниях каротажных приборов может быть обусловлена погрешностями углового разворота приемопередающих антенн. Показана возможность использования волоконно-оптических датчиков для определения сопротивлений породы. Описаны приборы, измеряющие электрическое сопротивление формации при бурении с помощью волоконной оптики. Отмечено, что использование волоконно-оптических датчиков в сочетании с коррекцией погрешности угла разворота антенн позволяет повысить точность бурения.

Ключевые слова: *каротаж, корреляционная матрица, волоконно-оптические датчики.*

DOI: 10.17072/psu.geol.30.26

Введение

При бурении нефтяных скважин выполняется каротаж, во время которого определяются различные параметры скважины, например, такие как плотность, электрическое сопротивление и акустическая плотность. Интерпретация каротажных данных зачастую сложна и неодно-

значна, современная геофизика старается решить эту проблему.

В работе рассмотрены данные Канзасской геологической службы (КГС) США (Kansas Geological Survey), которые находятся в открытом доступе в сети Интернет [1]. Выбрана скважина, расположенная в графстве Кингмэн на юге штата, в материалах КГС имеющая идентификатор 1045086036. Бурение производилось в

2010 г. компанией Dixon Energy. Глубина скважины составила 4878 футов (1487 м). Особенностью представленных файлов является то, что при отсутствии данных с каких-либо приборов в файл записывался не 0 и не пустое значение, а значение -999.2500, о чем было сказано в пояснении.

В файле были записаны измеренные параметры скважины на разной глубине (шаг изменения глубины равен 0,5 футам). В процессе бурения измерялись следующие параметры: пористость, кавернистость, пористость по данным плотностного каротажа, объемная плотность, поправка к объемной плотности, спонтанный потенциал, записывались данные гамма-каротажа, микрокаверномера, акустического каротажа. Ни один вид данных не был записан на каждой глубине, кроме того, некоторые из них удалось записать только на небольшом участке. Из-за этого был проведен анализ не по всем параметрам скважины, а только по тем, для которых было собрано достаточно данных (плотностного каротажа (DPOR), гамма-каротажа (GR), микрокаверномера (Melcal), пористость акустического каротажа (SPOR), всех трёх видов электромагнитного каротажа: ближнего (RLL3), среднего (RILM) и дальнего (RILD).

Результаты обработки данных

Обработка данных выполнялась в пакете MATLAB. В первую очередь была проведена замена значения -999,25 на 0, поскольку значением -999,25 было условлено обозначать отсутствие данных, а для визуализации, которая проводилась для анализа, использование 0 для отсутствующих данных более наглядно. Во-вторых, были проведены поиск и последующее исключение выбросов. Значения, признанные выбросами, были также заменены на 0. Для поиска выбросов определялось пороговое значение, превышение которого по модулю рассматриваемым параметром приводило к признанию данного значения параметра выбросом.

При визуализации были получены следующие графики (рис. 1, 2), где по горизонтальной оси отложена глубина (метры). Высокие сопротивления, полученные при электромагнитном каротаже, могут указывать на наличие пластов-коллекторов [6]. Обращает на себя внимание сходство показаний RILD и RILM: оба параметра имеют пик перед 2500 футов длиной около 200 футов, а также поднимаются после 4500 футов. Данные RILL3 похожи на RILD и RILM ниже 4000 футов, но в более близких к поверхности слоях в RILL3 другие показания.

Анализ полученных данных. Погрешности измерений

Для более точной, нежели визуальная, оценки сходства параметров, была построена корреляционная матрица. Результаты расчетов представлены в таблице.

Корреляционная матрица показывает: несмотря на то, что RLL3 не совпадает с RILM на пиках RILM, взаимосвязь между этими двумя параметрами (коэффициент корреляции равен 0,595) сильнее, чем между любыми другими рассмотренными параметрами. Следует отметить связь между RILD и RILM (0,386), RLL3 и RILD (0,324), а также SPOR и Melcal (0,279) и SPOR и GR (0,454). Последняя зависимость подтверждает, что гамма-каротаж и акустический каротаж используются для определения плотности породы.

Для остальных параметров наблюдается достаточно слабый коэффициент корреляции, поэтому можно принять, что в данном случае остальные параметры не оказывают влияния друг на друга.

В работе [10] показано, что в каротажном приборе, используемом для определения сопротивления пластов, существует погрешность, вызванная рассогласованием приемопередающих антенн по углу разворота. Эта погрешность является одной из причин, по которым отличие пока-

заний RILD, RILM и RLL3 столь существенно.

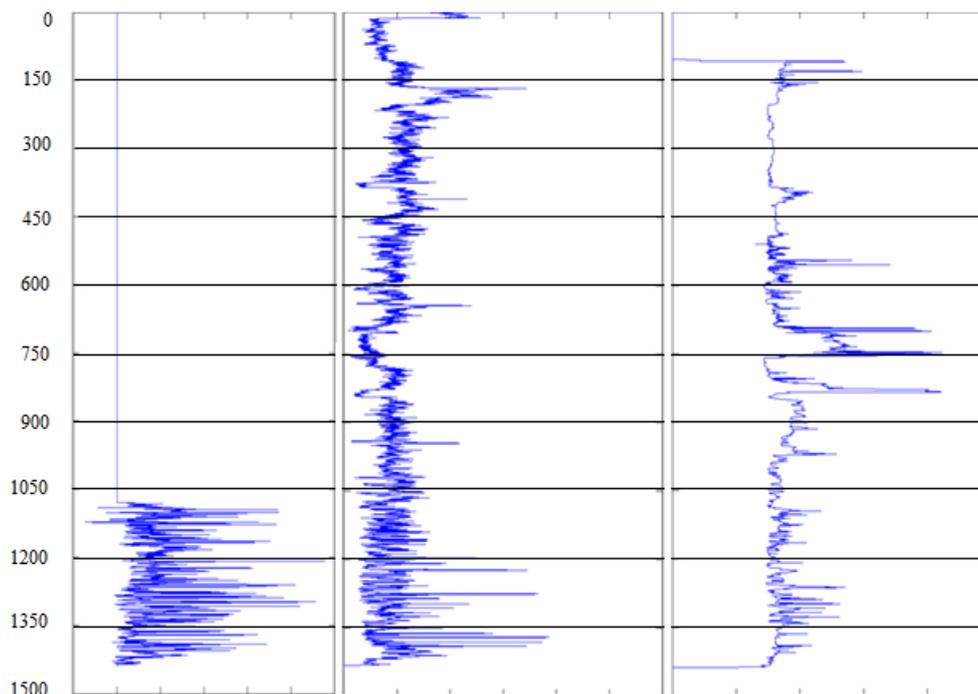


Рис. 1. Данные DPOR, GR, Melcal

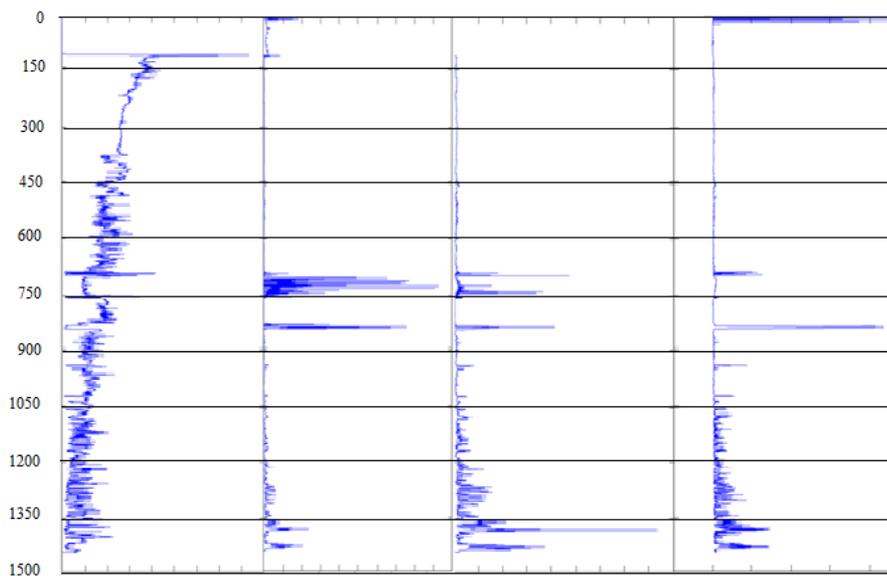


Рис. 2. Данные SPOR, RILD, RILM, RLL3

Корреляционная матрица параметров скважины

	DPOR	GR	Melcal	RILD	RILM	RLL3	SPOR
DPOR	1	0,0798	0,115	-0,0238	0,0514	0,0153	-0,236
GR	0,0798	1	-0,0204	-0,203	-0,241	-0,199	0,454
Melcal	0,115	-0,0204	1	0,0799	0,0747	0,0222	0,279
RILD	-0,0238	-0,203	0,0799	1	0,386	0,324	-0,225
RILM	0,0514	-0,241	0,0747	0,386	1	0,595	-0,305
RLL3	0,0153	-0,199	0,0222	0,324	0,595	1	-0,266
SPOR	-0,236	0,454	0,279	-0,225	-0,305	-0,266	1

Вид погрешности описан в [10], а также получена формула, по которой можно вычислить значение погрешности. Для ее устранения необходим дополнительный контроль угла рассогласования антенн до их установки в каротажный прибор и в бурильную колонну [8].

После нахождения корреляционной матрицы была построена модель линейной регрессии. Зависимой переменной была выбрана RLL3, а объясняющими – константа C , RILM и RILD.

Были получены следующие коэффициенты:

$$\begin{aligned} C &= 1,2, \\ RILM &= 1,664, \\ RILD &= 0,168. \end{aligned}$$

Коэффициент Дарбина–Уотсона для данной модели составил 0,435, что при большом объеме наблюдений говорит об отсутствии автокорреляции остатков и хорошем качестве регрессии.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,364, следовательно, нельзя описать RLL3 через RILM и RILD, хотя корреляция, очевидно, имеет место. Объяснить это можно, во-первых, тем, что свойства породы могут изменяться с удалением от бурильной колонны, а также возможными погрешностями в измерительных приборах.

Применение волоконно-оптических датчиков

В ряде источников отмечается возможность применения волоконно-оптических датчиков для определения многих каротажных параметров скважины. Например, в патенте [2] говорится, что волоконно-оптические датчики можно использовать для определения электрических сопротивлений, акустических свойств породы, химических свойств, естественной радиоактивности, плотности и других параметров. Датчики для измерения электрических сопротивлений формации располагаются в бурильной колонне и проводят измерения во время бурения (см. рис. 3) [5]. Датчики

на рисунке обозначены цифрой 1. В патенте отмечается, что измерения возможны при наклонно-горизонтальном бурении и наличии ответвлений от основной скважины [7].

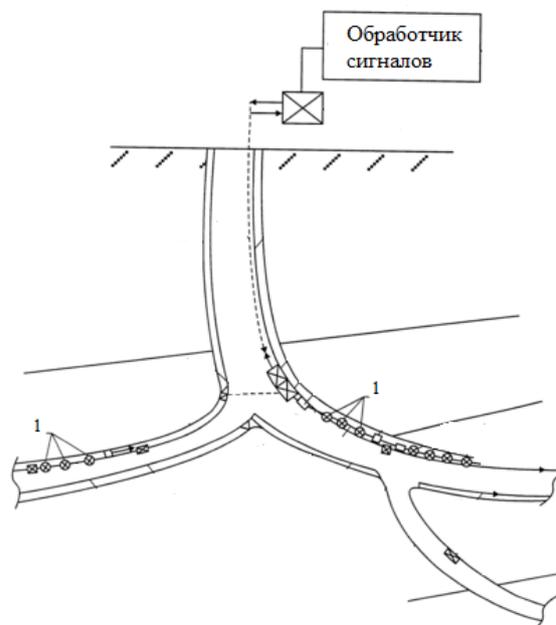


Рис. 3. Расположение датчиков при бурении

Использование волоконно-оптических датчиков может способствовать увеличению точности определения сопротивлений породы, что будет выражено в повышении коэффициентов корреляций между данными по ближнему, среднему и дальнему электромагнитному каротажу. В конечном счете повышение точности определения сопротивления породы даст возможность лучше контролировать попадание в пласт-коллектор и нахождение в нем [9].

В работе [3] показано, как располагаются антенны в каротажном устройстве, находящемся в бурильной колонне (см. рис. 4). В данном источнике описано применение антенн из проводящего материала, который изолирован диэлектриком, а именно базальтовым волокном.

В патенте [4] указывается, что антенны могут выполняться не только из ферритов, но из многих материалов, в том числе из стекловолокна. На рис. 5 показано приме-

нение антенн для определения электрических сопротивлений породы.

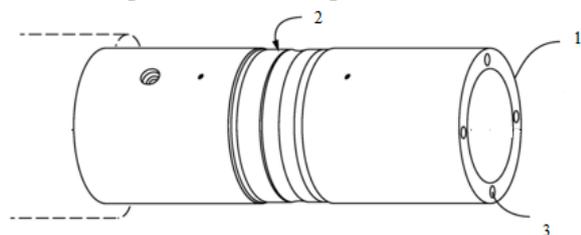


Рис. 4. Расположение волоконной антенны в каротажном приборе: 1 – цилиндрический корпус, 2 – выемка для антенны, 3 – резьбовые отверстия для присоединения других каротажных приборов

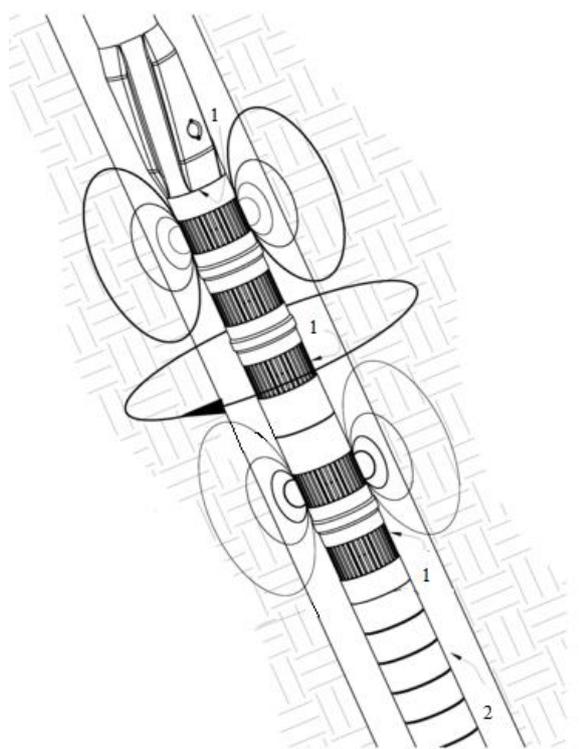


Рис. 5. Использование приемопередающих антенн для определения сопротивлений: 1 – приемопередающие антенны, 2 – скважина

Определение электрических сопротивлений и относительного угла наклона по трем парам приемопередающих антенн рассмотрено в [5, 6]. Волоконные антенны могут быть использованы в каротажных приборах для определения сопротивления породы. Кроме того, в [4] указывается, что волоконные антенны могут работать в

более сложных условиях, чем антенны из токопроводящих материалов.

Этот факт вместе с компенсацией погрешности из-за рассогласования угла разворота антенн позволяет говорить, что возможно создание каротажных приборов с антеннами из оптического волокна, которые будут точнее и надежнее существующих приборов с антеннами из токопроводящих материалов.

Выводы

Проведен анализ каротажных данных, полученных при бурении нефтяной скважины. Результаты анализа и проведенной визуализации позволили выявить зависимости между каротажными параметрами, которые представлены в виде графиков. Обнаружено, что данные по электромагнитному каротажу RLL3, RILM и RILD имеют существенные отличия друг от друга, при достаточно высоких коэффициентах корреляции. Отмечено, что кроме данных электромагнитного каротажа, хорошо коррелируются показания гамма-каротажа и акустического каротажа и показания микрокаверномера и акустического каротажа. Корреляция между остальными параметрами слаба либо отсутствует. Построена модель линейной регрессии, в которой RLL3 выражался через RILM и RILD. Показано, что коэффициент детерминации у такой модели низок и, следовательно, RLL3 не может быть выражен через другие параметры электромагнитного каротажа, что, возможно, объясняется изменением свойств породы, а также ошибками при измерениях. Отмечена возможность использования волоконно-оптических датчиков для определения параметров скважины.

Установлено, что на показания каротажных приборов может влиять ошибка в угле разворота приемопередающих антенн каротажного прибора. Описан способ ее устранения.

Рассмотрена возможность применения волоконно-оптических датчиков для определения электрического сопротивле-

ния формации при бурении. Описаны приборы, позволяющие измерять сопротивление формации с помощью волоконной оптики. Показано, что применение каротажных приборов с волоконно-оптическими датчиками вместе с коррекцией ошибки разворота приемопередающих антенн позволяет улучшить буровые характеристики и качество ствола наклонно-направленных скважин, особенно при необходимости геонавигации и бурения скважин со сложной траекторией.

Библиографический список

1. URL:<http://www.kgs.ku.edu/Magellan/Logs/> (accessed 02.29.2016)
2. Патент US 6268911 В1. Контроль за параметрами скважины и устройство, использующее волоконную оптику, 2001.
3. Патент US 20140176139 А1. Базальтовое волокно для наполнения антенн, применяющихся в каротаже, 2014.
4. Патент US 7265649 В1. Гибкое устройство для измерения сопротивления, 2007.
5. Патент US 6564833 В2. Продольно установленные приборы для каротажа во время бурения, 2003.
6. Патент US 8664587 В2. Невращающееся устройство для получения данных нейтронного каротажа во время бурения, 2014.
7. Патент US 5852587 А. Способ и устройство для акустического каротажа в процессе бурения скважины, пересекающей толщи пород, 1998.
8. Цветков Г.А., Егоров М.А., Ширяев П.Р. Разработка технологии, основанной на применении волоконно-оптических датчиков, для повышения качества бурения скважин // Каротажник. 2014. Вып. 10 (244). С. 94 – 100.
9. Шао Цайжуй, Цао Сяньцзюнь, Чжан Фумин, Шумилов А.В. Каротаж в процессе бурения и технология управляемой проводки наклонно направленных и горизонтальных скважин // Геофизика. 2015. Вып. 5. С. 68 – 76.
10. Ширяев П.Р., Савич А.Д., Цветков Г.А. Повышение точности определения значений удельного электрического сопротивления и углов относительного наклона при геонавигации // Каротажник. 2015. Вып. 14 (256). С. 123 – 131.

Analysis of a Logging Data Obtained While Oil Well Drilling and Feasibility Study of Fiber-Optic Sensors

P.R. Shiryaev, G.A. Tsvetkov

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskiy Ave., Perm 614000, Russia

E-mail: prshir@yandex.ru, zvetkov71043@mail.ru

Logging data obtained during oil well drilling were processed. Data were visualized and their correlation matrix was determined. The data types having the valuable correlation were identified. Linear regression model was defined and determination coefficient was estimated. The results of study showed that the data of deep, medium and shallow electromagnetic logging correlate with each other, but difference between some data types appeared significant. It was supposed that the difference in logging data may be caused by error in receiving and transmitting antennas angle turning. Feasibility of fiber-optics sensors for evaluation of resistivity of formation is shown. The article presents the brief review of the tools for measuring the formation electric resistivity while drilling using fiber-optic sensors. It is noted that using the fiber-optic sensors and correction of error of antennas turning angle may increase the drilling accuracy.

Key words: *logging, correlation matrix, fiber-optic sensors.*

References

1. *KGS* Digital wireline logs URL: <http://www.kgs.ku.edu/Magellan/Logs/> (accessed 02.26.2016)
2. *Patent* US 6268911 B1 Monitoring of down-hole parameters and tools utilizing fiber optics, 2001.
3. *Patent* US 20140176139 A1 Basalt Fiber Composite For Antenna In Well-Logging, 2014.
4. *Patent* US 7265649 B1 Flexible inductive resistivity device, 2007.
5. *Patent* US 6564833 B2 Rib-mounted logging-while-drilling (LWD) sensors, 2003.
6. *Patent* US 8664587 B2. Non-rotating logging-while-drilling neutron imaging tool, 2014.
7. *Patent* US 5852587 A. Method of and apparatus for sonic logging while drilling a borehole traversing an earth formation, 1998.
8. Tsvetkov G.A., Egorov M.A., Shiryaev P.R. 2014. Razrabotka tekhnologii, osnovannoy na primenenii volokonno-opticheskikh datchikov, dlya povysheniya kachestva bureniya skvazhin [Development of technology based on fiber-optics sensors application for increasing of well drilling accuracy. Karotazhnik. 10(244):94 – 100. (in Russian)
9. Shao Cai Rui, Cao Xian Jun., Zhang Fu Ming, Shumilov A.V. 2015. Karotazh v protsesse bureniya i tekhnologiya upravlyaemoy provodki naklonno napravlennykh i gorizontalnykh skvazhin [Logging while drilling and geosteering technology]. Geofisika. 5: 68 – 76. (in Russian)
10. Shiryaev P.R., Savich A.D., Tsvetkov G.A. 2015. Povyshenie tochnosti opredeleniya znacheniy udelnogo elektricheskogo soprotivleniya i uglov odnositelnogo naklona pri geonavigatsii [Increasing the accuracy of resistivity and relative dip angle measurements during geosteering]. Karotazhnik. 14(256):123 – 131. (in Russian)