

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ К КЛАССИФИКАЦИИ ТЕРМОГРАММ СКВАЖИН

В статье описывается подход к классификации термограмм скважин на основе метода распознавания сигналов. Термограммы классифицируются по наличию в них температурных аномалий определенного вида. Для идентификации аномалий в термограммах используется вейвлет-анализ.

Ключевые слова: термограмма скважины, температурная аномалия, вейвлет-анализ.

Введение

Термограммы скважин (зависимости температуры от глубины) отличаются очень широким разнообразием по форме и абсолютному значению температуры на одинаковых абсолютных отметках глубины (Христофоров и др., 2005). Если не учитывать процессы перераспределения температуры в скважине, связанные с её техническим состоянием и предысторией, то можно сказать, что на форму термограммы в первую очередь влияет глубинный тепловой поток Земли, теплофизические свойства горных пород и движение подземных флюидов. Проходя сквозь неоднородные по составу и свойствам слои, тепловой поток создает неповторимый, присущий только этому геологическому разрезу температурный «слепок», в котором запечатляются в виде отдельных особенностей все детали разреза и процессов, происходящих в нём.

До настоящего времени интерпретация термограмм проводится на основе их визуального анализа. В большинстве случаев этого оказывается вполне достаточно для того,

чтобы решать широкий круг вопросов. Например, контролировать состояние скважины и прискважинного пространства, осуществлять контроль за текущим состоянием процесса разработки месторождения или прогнозировать перспективы нефтегазоносности регионов (Христофорова и др., 2008). Установленный эмпирически набор закономерностей в распределении температуры в скважинах в ряде случаев позволяет определить количественные характеристики земных недр такие, как величина теплового потока из недр, его конвективная составляющая, теплопроводность горных пород в естественных условиях, направление и скорость движения насыщающих породы флюидов и т.д.

Сравнительная простота получения результатов при таком способе «чтения» термограмм может привести к ложному выводу о его достаточности. Термограммы, измеренные в разное время в разных скважинах, могут обнаруживать одинаковые особенности или, напротив, не содержать их. Особенности одного и того же происхожде-

Окончание статьи А.А. Иванова, М.Д. Залялютдиновой, В.Д. Скирды, С.С. Сафонова «Особенности роста метаногидрата в воде пенистой структуры»

Литература

Дядин Ю.А., Гушин А.Л. Газовые гидраты. *Сороковский Обзорный Журнал*. N3. 1998. 55-64.

Englegos P., Kalogerakis N., Dholabhai P.D., Bishnoi P.R. Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates. *Chemical Engineering Science*. V42. N11. 1987. 2647-2658.

Hao W., Wang J., Fan S. Study on methane hydration process in a semi-continuous stirred tank reactor. *Energy Conversion and Management*. V48. 2007. 954-960.

Kleinberg R.L., Flaum C., Griffin D.D., Brewer P.G., Malby G.E., Peltzer E.T., Yesinowski J.P. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability. *Journal of Geophysical Research*. V108. N10. 2003. 2508-2525.

Kuhs W.F., Staykova D.K., Salamatin A.N. Formation of methane hydrate from polydisperse ice powders. *Journal of Physical Chemistry B*. V110. 2006. 13283-13295.

Lekse J., Taylor C.E., Ladner E.P. Effect of bubble size and density on methane conversion to hydrate. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. V56. 2007. 97-100.

Makogon Y.F. Gas hydrates: prevention of their formation and utilization. Moscow: Nedra. 1985.

Max M.D., Pellenbarg R.E. Hydrate-based fuel storage and transport media: potential impact. *Proceedings Fuel Chemistry Division of the American Chemical Society*. CA. 1997. 463-466.

Takahashi M., Kawamura T., Yamamoto Y., Ohnari H., Himuro S., Shakutsui H. Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation. *Journal of Physical Chemistry B*. V107. N10. 2003. 2171-2173.

A.A. Ivanov, M.D. Salyalyutdinova, V.D. Scirda, S.S. Safonov.
Methane hydrate growth habit in foamed water.

In the given work results of experimental researches of methane hydrate growth in foamed water are presented. The original technique of preparation of such foamy structure is offered and tested. The simple theoretical model describing process of growth of hydrate at bubbles surface of foamy structure is offered. On the basis of the calculations spent according to offered model, some parameters of foamy structure are estimated and features of interaction of separate elements of such system are considered at methane hydrate growth.

Keywords: gas hydrates, methane hydrate, methane hydrate growth kinetics, NMR.

Анатолий Александрович Иванов
инженер кафедры молекулярных систем,

Миляуша Дамировна Залялютдинова
сотрудник кафедры молекулярных систем

Владимир Дмитриевич Скирда
д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедры молекулярных систем
Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18. Тел.: (843) 292-75-99.

Сергей Сергеевич Сафонов
PhD, начальник исследовательского отдела ООО «Технологическая компания Шлюмберже»

101000, Москва, пер. Огородная Слобода, 5А.
Тел.: (843) 292-75-99.

ния могут сильно отличаться по масштабу. Их форма может искажаться или маскироваться наложением особенностей другого вида и т.д. Всё это значительно усложняет обработку и анализ экспериментального материала в рамках прежних подходов.

Попытки строгого подхода к анализу формы термограммы и её особенностей показывают, что в ней может содержаться информация, недоступная обычным путём. Это наводит на мысль о возможности классификации термограмм по совокупности характерных особенностей. Их присутствие или отсутствие на термограммах может послужить основанием для отнесения термограммы к определённому типу. Такая классификация может существенно повысить информативность термограмм и эффективность их анализа.

Задача классификации термограмм аналогична задаче классификации (разделение набора объектов на классы) или распознавания (отнесение неизвестных объектов к одному из известных классов) физических сигналов и временных рядов. Существует ряд методов решения таких задач, например, Dynamic Time Warping (Berndt & Clifford, 1994), Hidden Markov Models (Rabiner & Juang, 1986). Один из наиболее успешных методов – вейвлет-анализ (Percival & Walden, 1999).

Классификацию термограмм скважин можно проводить по наличию в них температурных аномалий или последовательности аномалий определенного вида. Температурной аномалией будем называть любое отклонение графика температуры от идеальной геотермы. Для идентификации аномалий в термограммах используется вейвлет-анализ с предварительной обработкой термограммы (Бурганов, Христофоров, Христофорова, 2007).

Метод

Пусть функция $\psi(x)$ задает форму аномалии, а функция $f(x)$ является исследуемой термограммой. Пусть $\psi(x)$ удовлетворяет следующим условиям:

$$\psi(x) = 0, |x| > 1, \int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(x) dx = 1. \quad (1)$$

Задача состоит в том, чтобы найти интервал значений $x_1 < x < x_2$, в котором

$$f(x) = A + B\psi(C(x - x_0)) + \varepsilon, x \in (x_1; x_2). \quad (2)$$

Данное выражение означает, что аномалия может быть смещена по глубине, может иметь произвольную амплитуду и протяженность по глубине. Желаемым результатом является определение параметров A, B, C и x_0 . Вейвлет-анализ позволяет эффективно обнаруживать участки необходимого вида в сигнале, при условии, что параметры A и B являются константами. Поскольку это условие не удовлетворено в нашем случае, то требуется некоторая предварительная обработка термограммы.

Рассмотрим непрерывное вейвлет-преобразование с материнским вейвлетом ψ :

$$W_{\psi} f(a, b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{b-a}^{b+a} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (3)$$

где a – коэффициент растяжения по оси x или масштаб, b – смещение по оси x . Для локализации участков вида $1/\sqrt{a}\psi(x/a)$ в сигнале необходимо найти локальные максимумы функции $W_{\psi} f(a, b)$. Практически это означает, что при появлении мощных пиков на термограмме в интеграле $W_{\psi} f(a, b)$ тоже появятся пики, но они не будут связаны со схожестью сигналов. Поэтому представляется разумным привести термограмму к виду, исключающему появление пиков.

Во-первых, мы будем рассматривать термоградиент, а не температуру, т. к. именно график термоградиента описывает форму аномалий независимо от значений температуры. Далее введем функции $Df(a, t)$, $f_{\min}(a, k, t)$ и $f_{\max}(a, k, t)$:

$$Df(a, t) = f(t) * \Theta(at) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau) \Theta(a\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $\Theta(a)$ – сглаживающая функция полушириной a .

$$f_{\min}(a, k, t) = \min_{t-ka < \tau < t+ka} Df(a, \tau). \quad (5)$$

$$f_{\max}(a, k, t) = \max_{t-ka < \tau < t+ka} Df(a, \tau). \quad (6)$$

Сглаживание функции производится с масштабом $2a$, а максимум и минимум берутся в окне шириной $2ka$. Графики функций (4), (5) и (6) изображены на рисунке 1б.

Рис. 1. а) термограмма скважины 3915; б) графики функций $f_{\max}(a, k, t)$, $Df(a, t)$ и $f_{\min}(a, k, t)$; в) график функции $F_{a,k}(t)$.

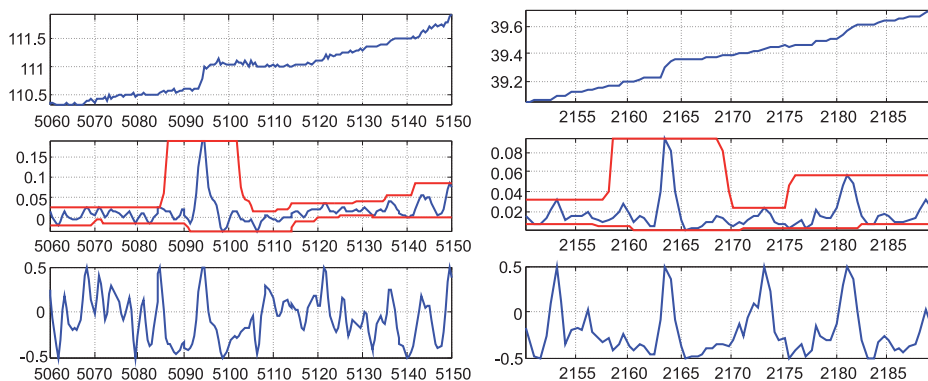
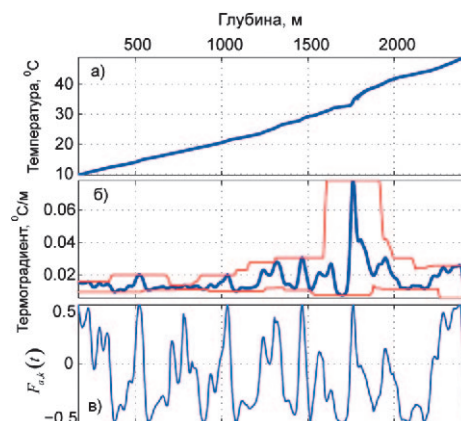


Рис. 2. Аналогичная обработка термограмм скважин 2009 и 1001.

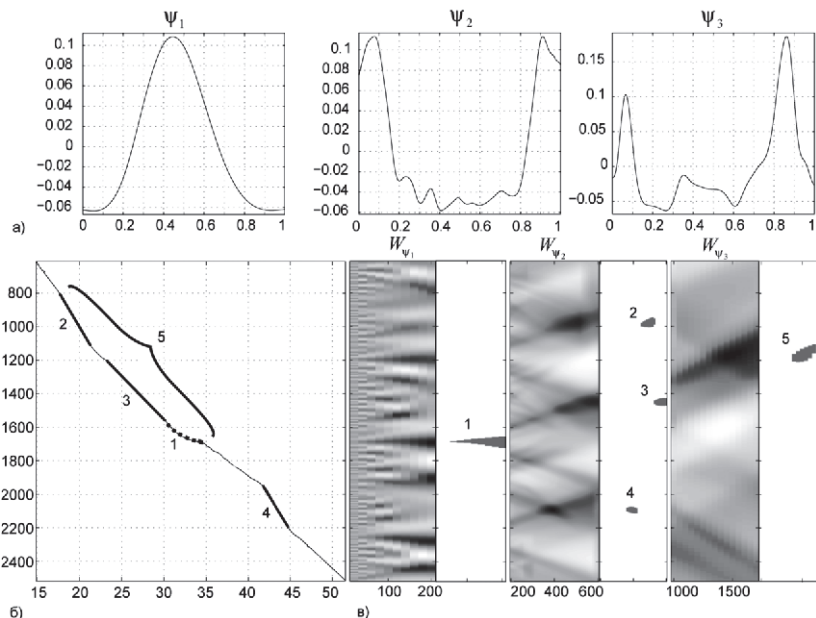


Рис. 3. Анализ скважины 20020 Бавлинская.

Рассмотрим функцию

$$F_{a,k}(t) = \frac{Df(a,t) - f_{\min}(a,k,t)}{f_{\max}(a,k,t) - f_{\min}(a,k,t)} - \frac{1}{2} \quad (7)$$

Функция $F_{a,k}(t)$ сохраняет особенности формы функции $Df(a,t)$, при этом она не имеет резких пиков и не смещена по оси y (Рис. 1в). Поэтому функция $F_{a,k}(t)$ вполне пригодна для вейвлет преобразования с масштабом a .

Поиск аномалий заданного вида осуществляется следующим образом. Для каждого вида аномалии создается вейвлет $\psi_i(t)$. Незвестная термограмма $f(t)$ преобразуется следующим образом:

$$\bar{W}_{\psi_i,k} f(a,b) \equiv W_{\psi_i} F_{a,k}(a,b) \quad (8)$$

При этом локальный максимум в точке (a, b) спектра преобразования $\bar{W}_{\psi_i,k} f$ будет указывать на интервал $(b - a; b + a)$, на котором функция $F_{a,k}(t)$ повторяет по форме вейвлет $\psi_i(t)$. Для того, чтобы выяснить принадлежность данного участка к аномалии данного типа, были использованы следующие дополнительные признаки:

1. $\frac{1}{2} (f_{\min} + f_{\max})$ – средний термоградиент аномалии,
2. $f_{\max} - f_{\min}$ – величина аномалии,
3. масштаб a , указывающий на протяженность аномалии по глубине.

Параметр этого процесса – число k , которое задает во сколько раз окно, в котором берутся максимум и минимум, больше окна сглаживания градиента. Оно задается вручную и зависит от сложности аномалий. В приведенном на рисунке 1 случае $k = 6$.

Результаты

Для анализа были отобраны порядка 30 термограмм скважин, измеренных авторами статьи. На этих термограммах были выделены три часто встречающихся типа температурных аномалий (распределений) разной толщины. Первый соответствует аномалии притока (масштаб 1 – 50 м), второй – участкам с постоянной теплопроводностью

(масштаб 200 – 400 м), третий – часто встречающийся участок термограммы протяженностью 800 – 1400 м с распределением термоградиентов пластов в определенной последовательности (Khristoforova et al, 2000). Были созданы три вейвлета ψ_1, ψ_2, ψ_3 для идентификации этих распределений (Рис. 3а).

В качестве примера приведем термограмму скважины 20020 Бавлинская, измеренной в 2005 г., и коэффициенты преобразований $W_{\psi_i,k}$ (Рис. 3б, в). На рисунке 3в также приведены найденные типовые распределения (цифры 1 – 5).

Приведенный метод позволил надежно обнаружить аномалии (распределения) трех типов на всех термограммах, на которых их присутствие было определено ранее визуальным способом. Метод эффективно оценивает параметры аномалии A, B, C и x_0 из выражения (2). В результате термограмма может быть представле-

на как совокупность аномалий (распределений) известных типов, что позволяет классифицировать термограммы и значительно упрощает анализ большого массива термограмм.

Литература

Бурганов Б.Т., Христофорова Н.Н. Идентификация структур в геологическом разрезе на основе анализа коэффициентов вейвлет-преобразования термограмм скважины. *Георесурсы*. № 4(23). 2007. 8-10.
 Христофорова Н.Н., Христофоров А.В., Бергеманн М.А. Анализ геотермических карт и перспективы нефтегазоносности глубинных отложений. *Георесурсы*. № 3(26). 2008. 10-12.
 Христофоров А.В., Христофорова Н.Н., Бурганов Б.Т. Температурные волны в природных средах: Фурье и вейвлет-анализ термограмм. *Георесурсы*. № 2 (17). 2005. 2-6.
 Berndt D., Clifford J. Using dynamic time warping to find patterns in time series. AAAI-94 Workshop on Knowledge Discovery in Databases (KDD-94). Seattle, Washington. 1994.
 Khristoforova N.N., Khristoforov A.V. and Muslimov R.Kh. Temperature distribution and anomalies in the crystalline basement. *Phys. Chem. Earth (A)*. Vol. 25. No. 6-7. 2000. 597-604.
 Percival D.B., Walden A.T. Wavelet methods for time series analysis. Cambridge University Press. 1999. 60-73.
 Rabiner L. R., Juang B. H. An Introduction to Hidden Markov Models. *IEEE ASSP Magazine*. 3(1). 1986. 4-16.

Б.Т. Бурганов, А.В. Христофоров, И.С. Абросимова. **Application of signal identification method to borehole temperature logs classification.**

Approach to the borehole temperature logs classification based on signal identification method is described. Temperature logs are classified by occurrence of specified temperature anomalies in them. Wavelet analysis is used for temperature logs anomalies identification.

Key words: borehole temperature logs, temperature anomalies, wavelet analysis.

Булат Талгатович Бурганов
 аспирант кафедры радиоэлектроники
 Анатолий Владиславович Христофоров
 к. ф.-м.н., доцент кафедры радиоэлектроники
 Ирина Семеновна Абросимова
 аспирант кафедры радиоэлектроники

Казанский (Приволжский) федеральный университет
 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18. Тел.: (843) 292-44-54.