© А.Г. Черников, Н.В. Либина, 2014

УДК 551.35:519.217

А.Г. Черников, Н.В. Либина

МАРКОВСКАЯ ГИПСОТОМОГРАФИЯ – НОВЫЙ СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ

Марковская гипсотомография представляет собой новый способ дистанционного прогнозирования и 3D моделирования глубинного строения и свойств подповерхностных отложений различного генезиса. Априорные данные о строении крупного региона, полученные на основании обработки результатов дистанционных измерений рельефа, позволяют с большей уверенностью осуществлять проектирование поисково-разведочных работ.

Ключевые слова: марковская гипсотомография, геологическая среда, измерение свойств земной поверхности, массив горных пород.

Создание трехмерной модели геологической среды основывается на большом объеме геофизических и геологических данных, собранных с определенной пространственной регулярностью, прошедших многоэтапную обработку и инкорпорированных в единую модель. Подобные исследования, являются весьма трудозатратным мероприятием. Проводятся они, как правило, только на локальных участках при разведке нефтегазовых месторождений, и доступ к данным затрудняет практикуемая корпоративная информационная закрытость. В результате – фрагментарность площадного покрытия исследованиями затрудняет создание региональных моделей, позволяющих изучать геологические объекты не только в исследованных областях, но и оценивать перспективность слабо изученных территорий. Такими были предпосылки постановки задачи разработки способа прогнозирования свойств и строения подповерхностных отложений по результатам дистанционного изучения характеристик Земной поверхности.

Для обеспечения многофакторного, нелинейного, динамического прогнозирования и моделирования строения и свойств геологической среды, как наиболее перспективный, был избран математический аппарат нелинейной Марковской статистики [1, 2].

Многие природные процессы, которые рассматриваются как случайные, характеризуются тем, что в них наблюдается некоторое влияние предшествующих событий на последующие. Эти процессы называются марковскими по имени русского математика А.А. Маркова [3], в работах которого они впервые были описаны в начале XX-го столетия.

Характерным, для марковских процессов, является то, что вероятность системы находиться в данном состоянии в заданный момент времени можно вывести из сведений о непосредственно предшествующем состоянии. Частным случаем марковского процесса является цепь Маркова – последовательность дискретных состояний во времени или пространстве, для которых вероятность перехода из одного состояния в другое, за последующий шаг, зависит от предшествующего состояния, или от нескольких состояний. Марковское свойство, или марковость, представляет собой зависимость вероятности каждого пе-

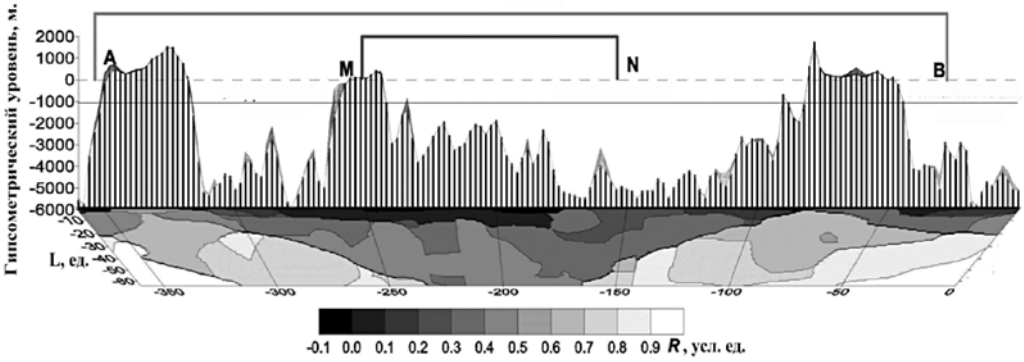

Рис. 1. Схема виртуальной установки AB MN марковского зондирования, рельеф земной поверхности и получаемая томограмма

рехода (P) от непосредственно предшествующего состояния (S_i) в момент времени (t_{i-1}) в состояние (S_j) в момент времени (t_i).

Марковская гипсотомография представляет собой новый способ обработки результатов дистанционных измерений свойств земной поверхности, с целью построения модели внутреннего строения исследуемого массива горных пород. Метод защищен патентом РФ [4].

Марковская гипсотомография базируется на предположении о наследовании марковских свойств рельефа подстилающей поверхности (или каких-либо других свойств нижележащих стратиграфических горизонтов) в рельефе или свойствах поверхности перекрывающих наслоений. Надо отметить, что это не означает прямое наследование собственно предшествующего рельефа последующим рельефом, т.к. наследуется только вероятность проявления марковских свойств.

Границы разделов слоев обладают рельефом, а следовательно, и свойствами, последовательно сформированными условиями осадконакопления, эпигенезом, тектонической историей и последующей изменчивостью. Каждая из границ может быть математически описана в виде простой однородной марковской последовательности отметок значений свойств по множеству профилей, секущих границу. Вертикальную изменчивость марковских описаний границ разделов следует рассматривать как изменение марковской последовательности величин значений свойств на границах и считать сложной марковской цепью, укрупненной по множеству исходных состояний. В этом случае, согласно теории марковских процессов, предыдущее состояние (марковость подстилающего слоя) вероятностно определяет состояние последующее – марковость покрывающего слоя. Следовательно, изучая определенным образом марковские свойства на дневной поверхности, представляется возможным решать обратную задачу – получать информацию о глубинном строении массива.

Для реализации этой идеи используются результаты регистрации измерениий свойств на поверхности Земли, преобразованные в числовую последовательность, и система обработки, позволяющая выполнять глубинное зондирование массива путем марковского преобразования измеренных свойств как по профилям, так и по площадям наблюдений.

Прогнозирование изменчивости марковских свойств с глубиной осуществляется путем выполнения компьютерного

анализа числовой последовательности марковских состояний свойств на дневной поверхности двумя окнами AB и MN (рис. 1), имитирующими измерительные установки, применяемые при электрическом зондировании.

Используя результаты математического моделирования, были рассчитаны «поля» влияния марковских свойств гипотетического множества границ раздела в плоскости геологического пространства на марковские свойства единичного отрезка находящегося на дневной поверхности. Координаты *ХУ*-пространства были определены в единицах количества точек наблюдения (рис. 2).

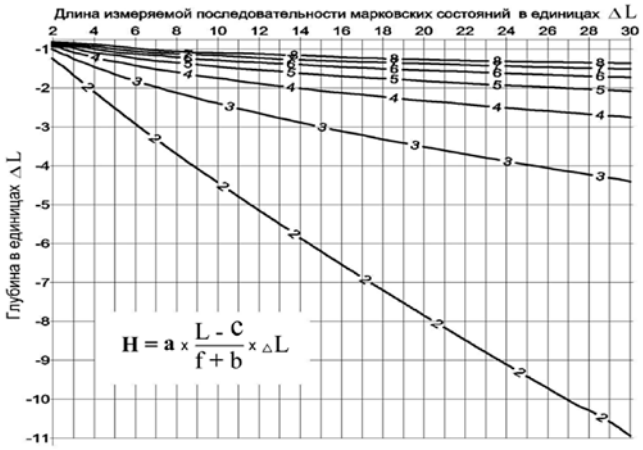

Рис. 2. Зависимость глубины зондирования от частотных характеристик (f) исследуемого параметра и длины последовательности (L), *a*, *b* и *c* – коэффициенты, зависящие от типа исследуемого поля

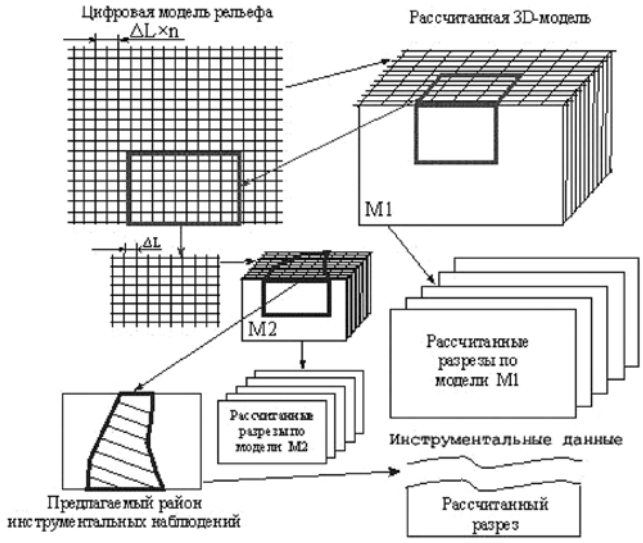

Рис. 3. Этапы применения метода Марковской гипсотомографии

По результатам выполненных исследований [5] установлено, что глубина зондирования H определяется, в основном, четырьмя факторами:

- шириной окна (количеством точек в исследуемой последовательности) *L*,
- шагом наблюдения (расстоянием между точками) ΔL,
- *f* – число состояний, определенных на шкале альтитуд,
- коэффициентами *a*, *b* и *c* зависящими от типа исследуемого поля.

$$H = a \times \frac{L - c}{f + b} \times \Delta L$$

Исходя из протяженности объекта исследования, дискретности данных (ΔL) и необходимой глубины исследования проводится выбор оптимальной частоты (*f*). Для этого проводится серия исследований с изменением параметров расчетов и выполняется сравнительный анализ результатов.

Расчеты по приведенному алгоритму проводятся при помощи специальной программы WinSlide [4].

Пересчет глубинного прогноза изменчивости свойств в пространствен-

ную 3D модель осуществляется программой FuzzMark, также использующей математический аппарат марковских процессов, но с нечеткими каналами наблюдения. Особенностью создаваемой модели является то, что она представляет собой не просто набор пространственных координат с метками – свойствами, а вероятностный образ исследуемого свойства в нечетких координатах моделируемого пространства. Также особенностью разработанной системы моделирования является ее «геологичность», т.е. структура модели воспроизводит резкую смену геологических формаций вызванных сменой литологии, тектонической нарушенностью, размывом, замещением и т.п. Расчет и построение томограмм осуществляется путем распознавания свойств в заданных точках декартового пространства (*X*, *Y*, *Z*). На выходе модели получается вероятностная оценка распределения геолого-геофизических характеристик на ортогональных плоскостях сечения (томограммах).

Последовательность операций для томографического анализа определенной территории (акватории) состоит в следующем. Основой для проведения расчетов и построения трехмерных моделей служат площадные цифровые карты рельефа. По ним можно выпол-

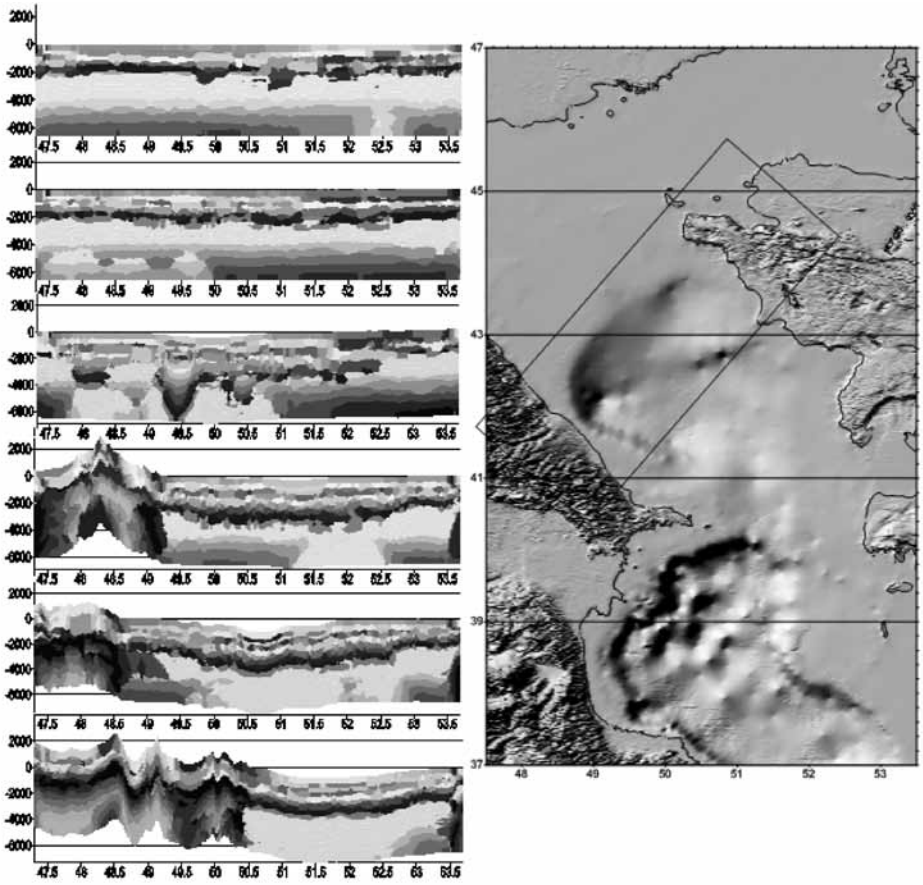

Рис. 4. Цифровая карта и томограммы, рассчитанные по 3D модели Каспийского моря

нить оперативный прогнозный расчет 3D модели подповерхностной структуры массива пород на значительные территории и инвертировать ее в петрофизические свойства (например в скорости продольных волн). Шаг данных составляет от 1 до 5 км в зависимости от величины рассматриваемого района и необходимой глубины прогноза. По рассчитанным разрезам 3D модели могут быть выделены участки для более детального анализа по тем же исходным данным, но с меньшим шагом. Соответственно могут быть использованы цифровые модели большей детальности данных. Результаты расчетов могут использоваться для планирования инструментальных исследований: скоростная 3D модель позволяет выделить перспективные участки исследований и проследить их пространственное расположение (рис. 3).

Для демонстрации применения метода приведены полученные структурные и скоростные модели для Каспийского региона (рис. 4) в виде набора томограмм. Шаг батиметрической сетки 2 км, частота «зондирования» f = 11. Источник данных [6, 7].

Профили на рис. 4, ориентированные в широтном направлении, совмещены с параллелями на цифровой карте. В верхней части рисунка обозначен прямоугольником сектор, определенный для расчета скоростной томографической модели на части акватории Каспийского моря и последующего сопоставления ее с геологической моделью из работы [8] (рис. 5).

На рис. 5 показан набор томограмм, полученных по трем взаимно ортогональным сечениям модельного куба скорости размером 650x230x5 км (на карте рис. 4 вы-

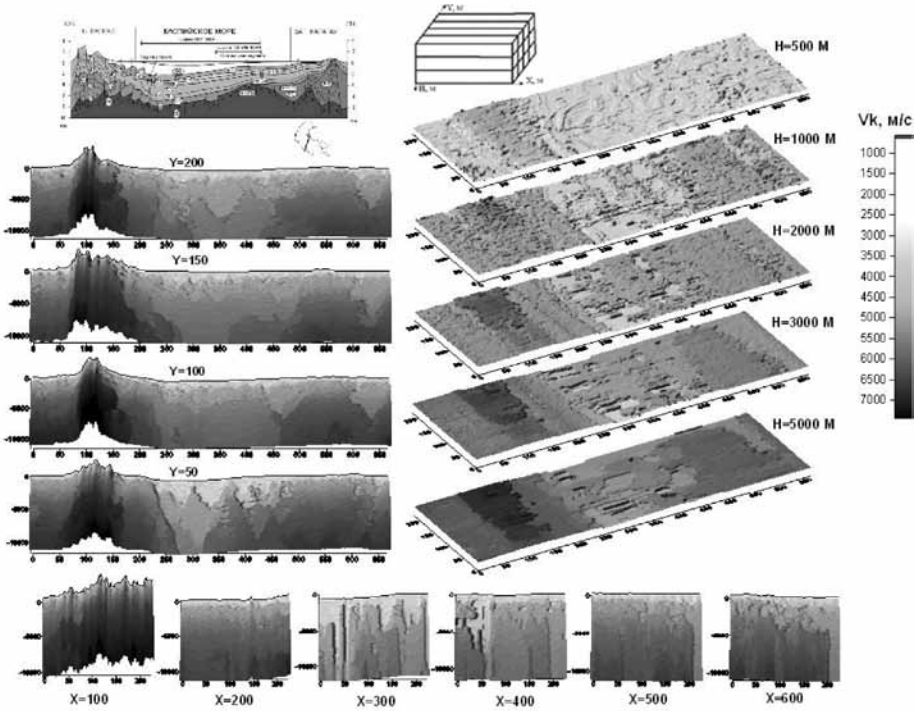

Рис. 5. Скоростная 3-Д модель района Каспийского моря, выделенного на схеме профилей прямоугольником

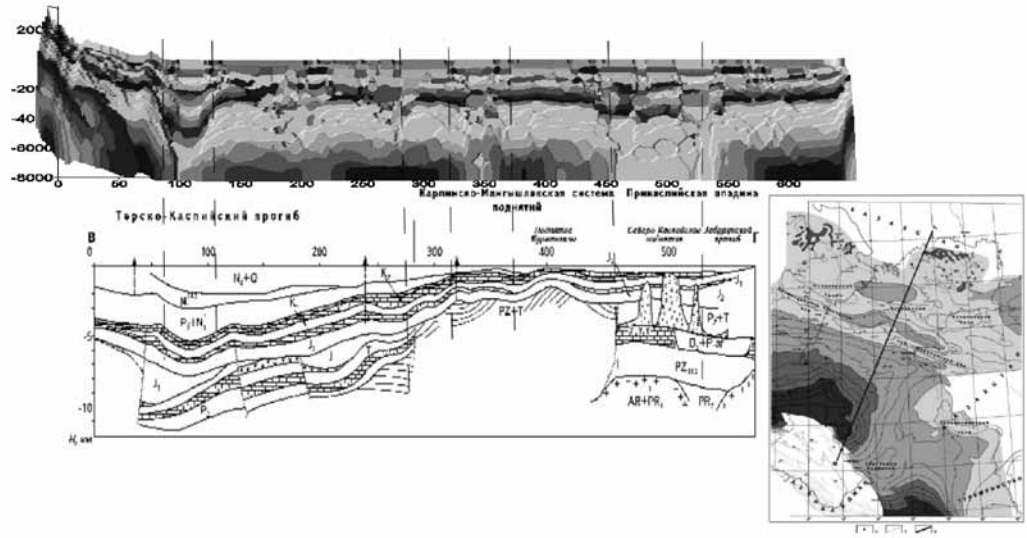

Рис. 6. Сопоставление гипсотомограммы и геолого-геофизического разреза [9]

делен прямоугольником), шаг данных 1 км, частота «зондирования» $f = 11$. В верхней части рис. 5 для сопоставления с рассчитанными томограммами приведен геологический разрез, полученный на основе сейсмо-геологических исследований, проводившихся ранее в этом районе Каспийского моря [8]. Томограммы свойств пересчитаны в разрезы петрофизических свойств методом марковской инверсии по априорной информации об акустических свойствах среды. Для этого используется метод многомерного регрессионного анализа, с помощью которого были выполнены преобразования марковских характеристик среды в петрофизические в значения кажущейся скорости – V_k м/с (рис. 6).

Для оценки соответствия гипсотомографических прогнозов существующим представлениям о геологическом строении изучаемых регионов, они сопоставлялись с имеющимися в открытой печати геологическими моделями [8, 9]. Подобное сравнение приводится на рис. 6. Не вдаваясь в подробный анализ моделей, и не оценивая достоверность привлеченного эталона, можно отметить очевидное соответствие в положении отдельных ключевых структур.

Таким образом изложенный способ Марковской гипсотомографии позволяет осуществлять прогноз (зондирование) строения массива путем марковского преобразования отметок высот (батиметрических данных при морских исследованиях), как по профилям, так и по площадям наблюдений, осуществлять пересчет их в глубинную 3D модель, проводить петрофизическую инверсию до визуализации в виде томограмм, по различным сечениям моделируемого массива.

Используя минимум входных данных, в частности цифровые модели рельефа и (или) результаты батиметрической съемки, метод марковской гипсотомографии позволяет:

- создавать петрофизические 3D модели по площадным данным;
- выполнять предварительный анализ строения исследуемого района;
- выявлять зоны структурных нарушений;
- намечать участки для проведения детальных исследований комплексом геолого-геофизических методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вистелиус А.Б.* Основы математической геологии. – Л.: Наука, 1980. – 389 с.
2. *Харбух Дж., Бонэм-Картер Г.* Моделирование на ЭВМ в геологии. – М.: Мир, 1974. – 319 с.
3. *Марков А.А.* Исследование замечательного случая зависимых испытаний // Изв. Петерб. АН (6). – 1907. – Т. 1, № 3 – С. 61–80.
4. *Черников А.Г., Либина Н.В., Матушкин М.Б.* Патент на изобретение «Способ выявления внутренних неоднородностей Земли», № 2293361, 2004 г.
5. *Черников А.Г., Матушкин М.Б., Либина Н.В.* Изучение внутреннего строения Земли на основе марковского анализа гипсометрии ее поверхности // Разведка и охрана недр. – 2001. – № 2. – С. 57–59.
6. *Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А.* Каспийское море: экстремальные гидрологические события. – М.: Наука, 2007. – 382 с.
7. Цифровая модель рельефа дна Каспийского моря. – URL: http://www.caspi.ru/
8. *Хортов А.В., Непрочнов Ю.П.* Глубинное строение и некоторые аспекты нефтегазоносности южных морей России // Океанология. – 2006. – Т. 46. – № 1. – С. 114–122.
9. *Федоров Д.Л.* Каспийский мегабассейн – особенности геодинамики и нефтегазоносности // Геология нефти и газа. – 2006. – № 1. – С. 11–16. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Черников Александр Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук,
e-mail: A_Chernikov@vniigaz.gazprom.ru, ООО «Газпром ВНИИ ГАЗ»,
Либина Наталия Викторовна – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

UDC 551.35:519.217

MARKOV HYPSOTOMOGRAPHY AS A NEW METHOD OF REMOTE GEOLOGICAL STRUCTURE FORECASTING IN OIL-AND-GAS FIELDS

Chernikov A.G., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
e-mail: A_Chernikov@vniigaz.gazprom.ru, Gazprom VNII GAZ,
Libina N.V., P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences.

The Markov hypsotomography is a new method of remote forecasting and 3D modeling of deep-level structures and properties of subsurface deposits of various genesis. The a priori data on structure of a large region, obtained from processed distant measurements of relief, allow higher confidence planning of exploration.

Key words: Markovian gypsotomography, geological medium, determination of ground surface properties, rock mass.

REFERENCES

1. Vistelius A.B. *Osnovy matematicheskoj geologii* (Fundamentals of mathematical geology), Leningrad, Nauka, 1980, 389 p.
2. Harbuh Dzh., Bonjem-Karter G. *Modelirovanie na JeVM v geologii* (Computer-aided modeling in geology), Moscow, Mir, 1974, 319 p.
3. Markov A.A. Issledovanie zamechatel'nogo sluchaja zavisimyh ispytanij (Analysis of a remarkable case of dependent trial), *Izv. Peterb. AN (6),* 1907, vol. 1, no 3, pp. 61–80.
4. Chernikov A.G., Libina N.V., Matushkin M.B. *Patent RU 2293361*, 2004.
5. Chernikov A.G., Matushkin M.B., Libina N.V. *Razvedka i ohrana nedr*, 2001, no 2, pp. 57–59.
6. Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Ljubushin A.A. *Kaspijskoe more: jekstremal'nye gidrologicheskie sobytija* (Caspian Sea: Extreme hydrological conditions), Moscow, Nauka, 2007, 382 p.
7. Cifrovaja model' rel'efa dna Kaspijskogo morja (Digital model of bottom topography of the Caspian Sea), available at: http://www.caspi.ru/
8. Hortov A.V., Neprochnov Ju.P. *Okeanologija*, 2006, vol. 46, no 1, pp. 114–122.
9. Fedorov D.L. *Geologija nefti i gaza*, 2006, no 1, pp. 11–16.