

УДК 622.831:550.8

А.Г. Черников, М.Б. Матушкин, Ю.С. Исаев

**НОВЫЙ СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ**

Новый способ изучения глубинного строения массива горных пород, базирующийся на предположении о наследовании Марковских свойств рельефа поверхности нижележащих горизонтов Марковскими свойствами поверхностей перекрывающих отложений.

Ключевые слова: геотомография, марковские процессы, зондирование, тектоническая нарушенность массива.

Семинар № 3

Сложность проблем представления внутреннего строения геологических объектов, изучение в динамике тектонических и физико-химических процессов, привели к появлению новых методов ее изучения, объединенных общим термином — геотомография. Слово томография можно перевести с греческого как «**изображение среза**». Это определяет назначение томографии — получение послойного изображения внутренней структуры объекта исследования. Собственно, Марковская томография представляет собой новый способ обработки результатов профильных и площадных наземных, подземных и дистанционных измерений геологических, геофизических, геохимических, биохимических и др. полей с целью построения модели внутреннего строения массива горных пород (МГП), основой которого является изучение марковских свойств измеренных геополей различного генезиса. Метод защищен патентом РФ. [3]

Суть способа состоит в следующем. Известно, что многие природ-

ные процессы (геологические процессы — не исключение), характеризуются тем, что в них наблюдается некоторое влияние предшествующих событий на последующие. Эти процессы носят название марковских [1]. 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 — ее можно рассматривать как последовательность дискретных состояний во времени или пространстве, для которых вероятность перехода из одного состояния в заданное, за последующий шаг, зависит от предшествующего состояния. Марковское свойство, или марковость, представляет собой зависимость вероятности каждого перехода от непосредственно предшествующего состояния (S_i) в момент времени (t_{i-1}) в состояние (S_i) в момент времени (t_i). Наиболее ярким примером проявления марковских свойств в

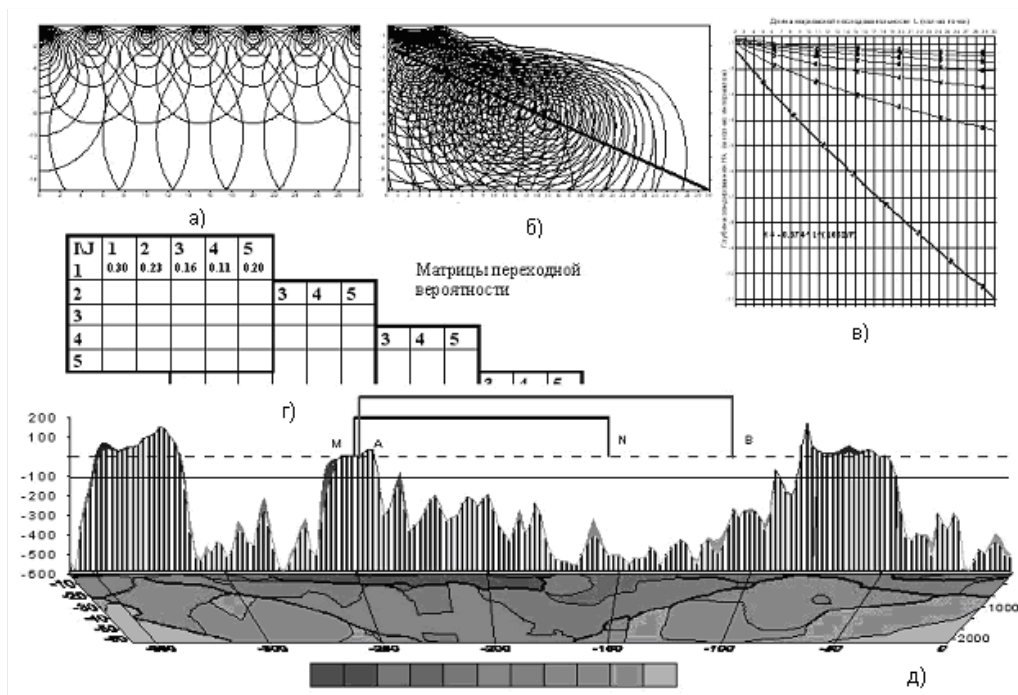


Рис. 1. Моделирование основных параметров томографических моделей: а — расчет модели глубинного распределения параметров марковского «поля» измеряемого на дневной поверхности; б — изменение интегрированных значений поля при различной длине последовательностей; в — Зависимость глубины зондирования от частотных параметров исследуемого параметра и длины последовательности; г — Пример марковской последовательности представленной в виде последовательности матриц переходных вероятностей; д — Схема виртуальной установки марковского зондирования и получаемая томограмма

геологии являются чередование слоев литологических типов в стратиграфических (временных) последовательностях.

Новый способ изучения глубинного строения массива горных пород базируется на предположении о наследовании марковских свойств рельефа поверхности (или каких-либо других свойств нижележащих стратиграфических горизонтов) в рельефе или свойствах поверхности перекрывающих наслоений. С позиций математической геологии это предположение заключается в следующем. Пусть имеется несколько последовательно залегающих слоев (толщ), кон-

трастных по геолого-геофизическим свойствам. Границы разделов слоев обладают рельефом, а следовательно, и свойствами, последовательно сформированными условиями осадконакопления, эпигенезом, тектонической историей и последующей денудацией. Каждая из границ может быть математически описана в виде простой однородной марковской последовательности отметок значений свойств по множеству профилей, секущих границу. Вертикальную (стратиграфическую) 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. [1]. В этом случае, согласно теории марковских процессов, предыдущее состояние (марковость подстилающего слоя) вероятно определяет состояние последующее — марковость покрывающего слоя. Следовательно, изучая определенным образом, марковские свойства на дневной поверхности, представляется возможным получить информацию о глубинном строении региона.

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. При расчете учитывались вертикальная, но и тангенциальная составляющие «поля» (рис. 1, а-д).

Численное интегрирование профиля поля на интервале дневной поверхности содержащем от 3 до 30 точек (пикетов), позволило рассчитать диаграмму «глубинности» марковского зондирования в зависимости от длины исследуемой последовательности. Исследование реальных моделей марковского зондирования показало существенное снижение глубинности зондирования с увеличением количества состояний (частоты) в марковской последовательности. [5] Согласно выполненным исследованиям, глубина зондирования H определяется, в основном, четырьмя факторами — шириной окна (количеством точек в исследуемой последовательности) L , шагом наблюдения (расстоянием между точками) ΔL , частотной характе-

ристической анализируемого параметра f (числом определенных на шкале альтитуд состояний), а также коэффициентами a и b , зависящими от типа исследуемого поля. Максимальная глубина зондирования достигается на минимальной частоте $f=2$. Увеличение длины исследуемой последовательности ведет к снижению разрешающей способности метода. Метод также имеет ограничения и по минимальной глубине исследования. При глубинном зондировании на низких частотах существует приповерхностная «мертвая зона» толщина которой определяется расстоянием между пикетами и частотой зондирования. Для изучения этого интервала необходимо повышать детальность исследований (уменьшить расстояние между пикетами или повысить частоту зондирования).

Для реализации идеи выявления внутренних неоднородностей Земли используются известные способы измерения и регистрации свойств на дневной поверхности и автоматизированная система обработки, позволяющая выполнять глубинное зондирование массива путем марковского преобразования измеренных свойств поверхности, как по профилям, так и по площадям наблюдений. Получение томограмм на основании профильных измерений осуществляется следующим образом. Вся совокупность значений (в примере — альтитуды рельефа исследуемого участка) измеренных по линии экватора разбиваются на n — состояний ($n \geq 2$). Компьютерный анализ числовой последовательности осуществляется двумя окнами АВ и MN ($AB \gg MN$), имитирующими измерительные установки применяемые при электрическом зондировании, в интервале которых величины преобразуются в значения переходных вероятностей случайной марков-

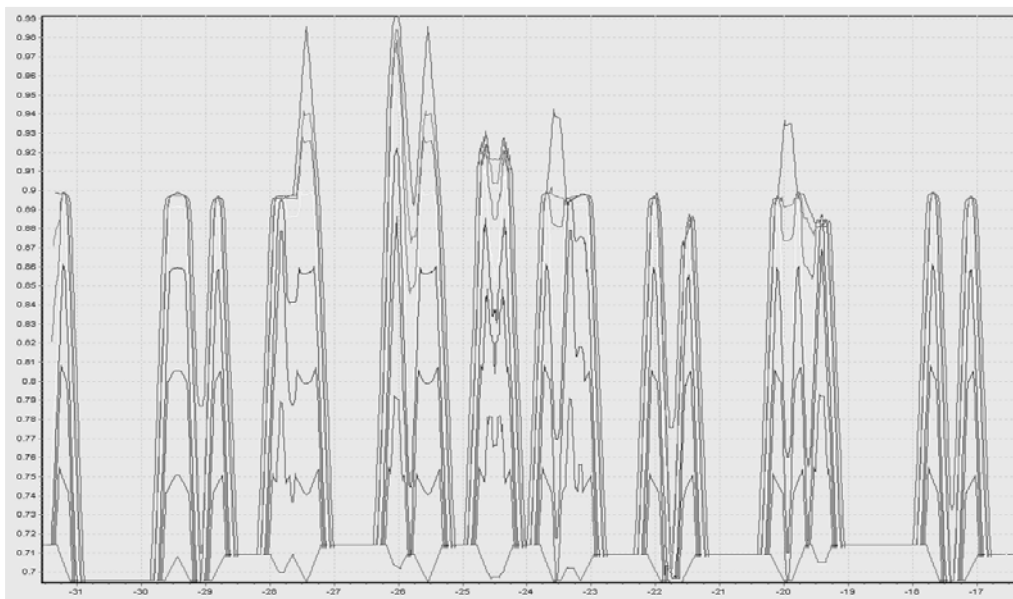


Рис. 2. Серии кривых профилирования выполненные с различными размерами окон (длины регистрируемых Марковских последовательностей) $F = 3$, $s = 20$ м

ской последовательности. Сравнивая серии значений в двух окнах в последовательных «пикетах» исследуемого профиля получается серия кривых, отражающих изменения марковских свойств рельефа глубинных горизонтов (рис. 2. д). Результаты сравнения, выполненные для различных размеров окна L (MN), выносятся на решетку с координатами X и L (или X и H) и после интерполяции получается томограмма, отображающая моделируемый глубинный разрез. На рисунке показаны отметки абсолютных значений высот на профиле. Выполняя марковское зондирование для последовательных точек профиля при различных размерах окна MN , получаем серии кривых глубинного зондирования, которые после соответствующей обработки трансформируются в глубинные разрезы (рис. 2, д).

Как и любой измеряемый сигнал, Марковские свойства рельефа дневной поверхности содержат спектр

частот — от низких, до высоких. Выбор частот для получения эффективных моделей во многом определяет успех решения геотехнической задачи. Одним из способов избавления от низкочастотной составляющей является снятие тренда. Численная оценка и снятие низкочастотного тренда выполняется путем расчета интерполяционной кривой и вычитания полученных значений из наблюдаемой кривой.

После избавления от низкочастотных гармоник спектра проводится выбор оптимальной частоты для проведения Марковского анализа свойств гипсометрии дневной поверхности. Для этого проводится серия исследований с изменением параметров регистрации и выполняется сравнительный анализ наблюдений. На рис. 4 приводится одна из подобных серий наблюдений. Одним из критериев выбора оптимальной частоты зондирования является соотношение линейной про-

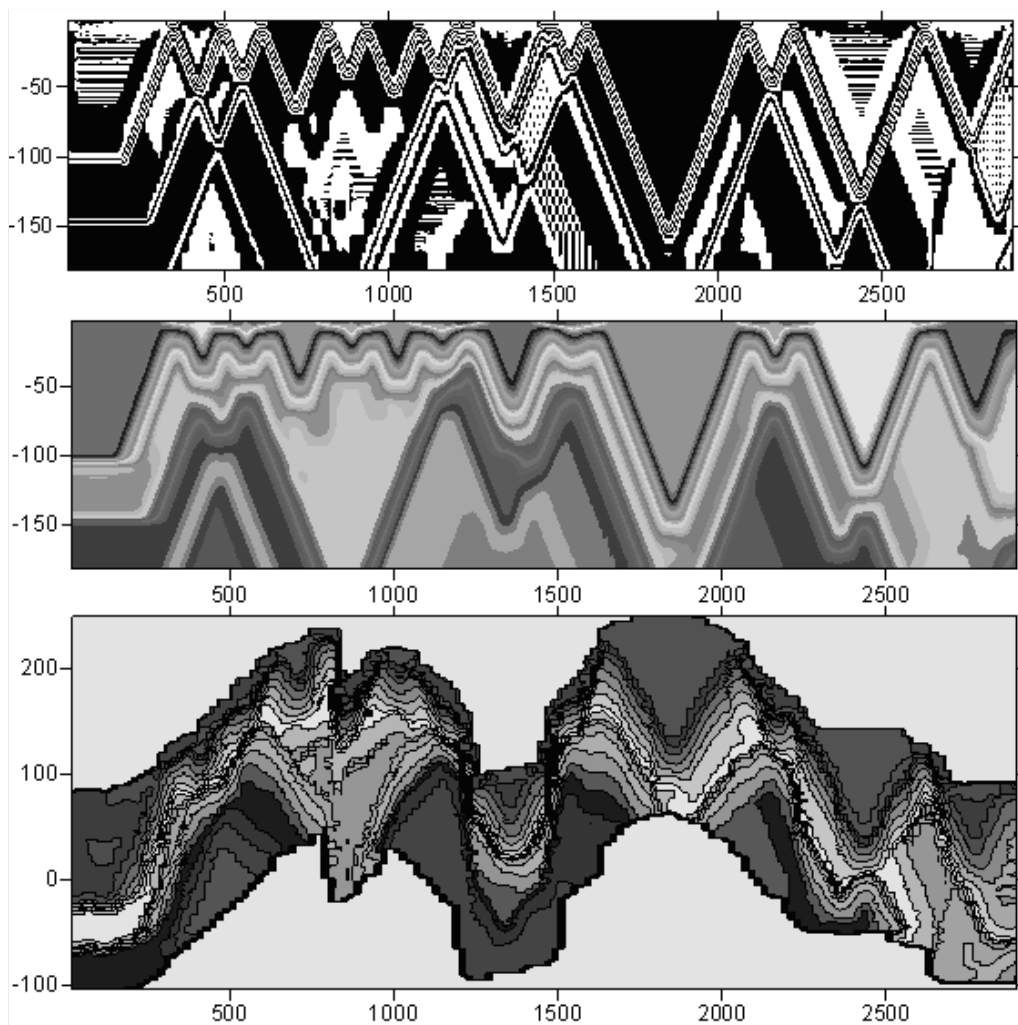


Рис. 3. Последовательность глубинных трансформаций кривых Марковского гипсометрического профилирования

тяженности объекта исследования и максимальная требуемая глубина Марковского зондирования.

Серия профильных кривых составляющая пакет, выполненная с оптимальными параметрами наблюдения, преобразуется в разрез, вертикальная шкала которого выражена в единицах длины марковской последовательности, причем отсчет начинается с минимального размера окна

— 3. Построенный сведенный разрез разбивается на частные разрезы, которые подвергаются ряду процедур обработки, и пересчитываются в глубинные разрезы, начинающиеся от дневной поверхности и продолжающийся в нижнее полупространство.

На следующем этапе обработки в модель вводятся поправки за изменчивость гипсометрических отметок

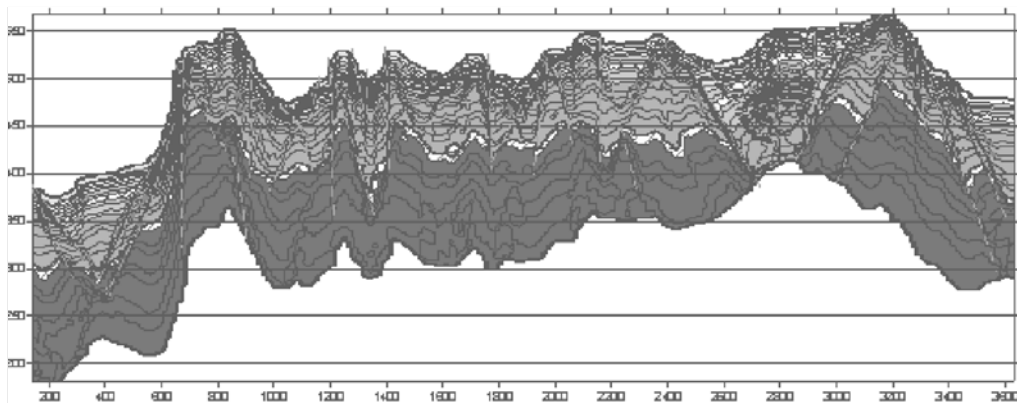


Рис. 4. Распределение аномальных зон на томограмме массива, вызванных нарушением однородности распределения измеренных Марковских характеристик

рельефа в результате чего получаем модель внутреннего строения массива в координатах фактического пространственного положения исследуемого объекта (нижний фрагмент рис. 3).

На верхнем рисунке показан результат обработки разреза, приведенный к глубинам, рассчитанным в нижнее полупространство от выровненной горизонтальной линии проекции измеренных высот на дневную поверхность. На среднем рисунке представлена та же томограмма МГП подвергшаяся частотной фильтрации. Внизу — этот разрез, но приведенный к фактическим значениям высот рельефа дневной поверхности.

Заключительным этапом обработки является получение структурированной модели объекта. Процесс заключается в преобразовании вычисленных в процессе Марковского профилирования значений Марковских свойств к значениям структурированных свойств, содержащих стратиграфическую, латеральную и структурную компоненты.

Дальнейшая обработка результатов марковского профилирования направлена на выявление внутренних

особенностей модели, проявляющих различные присущие ей атрибуты — состав, строение, состояние свойства.

Тектоническая нарушенность массива представляет собой пространственное распределение аномалий на фоне «нормального» геологического фона. На этом принципе — выявление структурных аномалий — основана методика прогноза тектонической нарушенности по томограммам. Для решения этой задачи используются следующие алгоритмы: а) градиентный анализ предварительно обработанного поля Марковских свойств; б) оценка изменчивости значений стандартного отклонения от среднего значения Марковского поля; в) дисперсионный анализ поля; г) энтропийный анализ поля (Шенноновская энтропия); д) марковский анализ Марковского поля; е) метод пластовых маркеров. Эффективным проявил себя метод пластовых маркеров отличающийся универсальностью при обработке разнотипных разрезов.

На рис. 4 показана структурированная томограмма по профилю тоннеля с нанесенными маркерами — 2-мя контрастно окрашенными слоями, позволяющими визуально выявлять

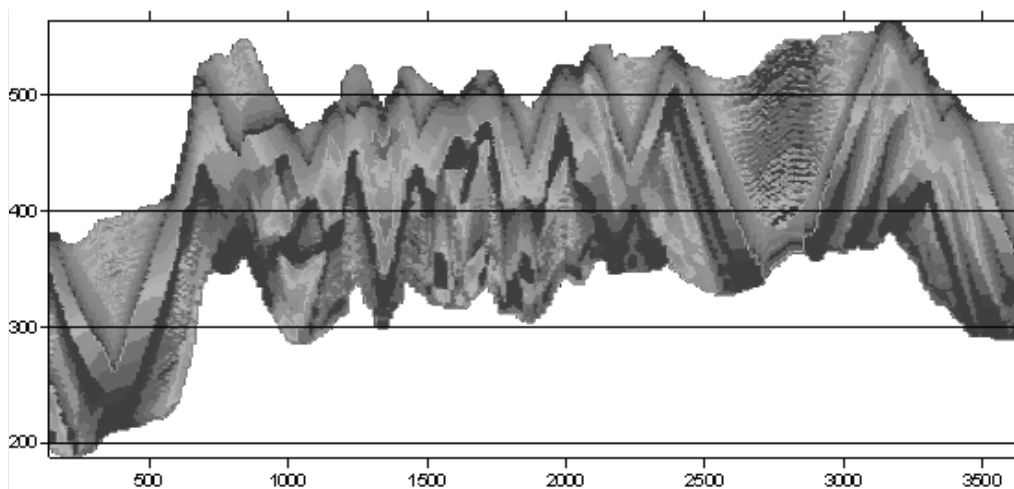


Рис. 5. Исследование тонкой структуры на томографическом разрезе массива горных пород. Частота марковского зондирования $F = 4$

нарушения сплошности Марковского поля. Помимо аномалий, проявляющихся в поведении маркеров, в разрезах просматривается еще 2 типа аномалий — это аномалии плотности изолиний и аномалии связанные с тектоническими нарушениями, проявляющимися в форме рельефа поверхности и трассируемые в глубину разреза. Большинство выделенных на разрезах нарушений определены по сочетанию как минимум двух из трех признаков.

Переход на более высокие частоты марковского зондирования позволяет исследовать более тонкие структуры в строении массива. Так, например, на рис. 5 просматриваются слоистая структура осадков накопленных в карманах в левой и правой частях.

Помимо оценки нарушенности массива, марковская гипсотомография позволяет выполнять прогнозирование петрофизических характеристик пород в массиве методом марковской гипсометрической инверсии.

Марковская гипсотомографическая инверсия — это вычислительный процесс, в котором на основе полу-

ченных томограмм и некоторой априорной информации о плотностной и акустической модели среды прогнозируются различные свойства массива. Теоретически свойства инверсии базируются на представлении Марковской модели среды в виде свертки множества сигналов (матриц переходных вероятностей) в компактный сигнал — Марковский идентификатор, получаемый в процессе обработки последовательности данных. В общем случае это представление выглядит следующим образом:

$$P1 = \sum_{j=1}^N R_j \cdot W_j + n_i;$$

где R_i — Коэффициент контрастности среды, W_i — Марковский идентификатор, n_i — помеха.

В этом случае инверсию можно рассматривать как обратную задачу, заключающуюся в нахождении R_i через значения идентификатора и изоморфной (с сохранением всех математических свойств) подменой их значениями других параметров, характе-

ризирующих свойства моделируемого объекта. В качестве исходных для инвертирования показателей используются плотность и скорость продольных упругих колебаний. Дальнейшие преобразования проистекают из наличия парагенетических связей между

множеством свойств присущих объекту. Для решения этой задачи используются различные способы. Наиболее популярные — это методы и алгоритмы регрессионного анализа и распознавания образов с обучением. Так, марковская модель разреза преобра-

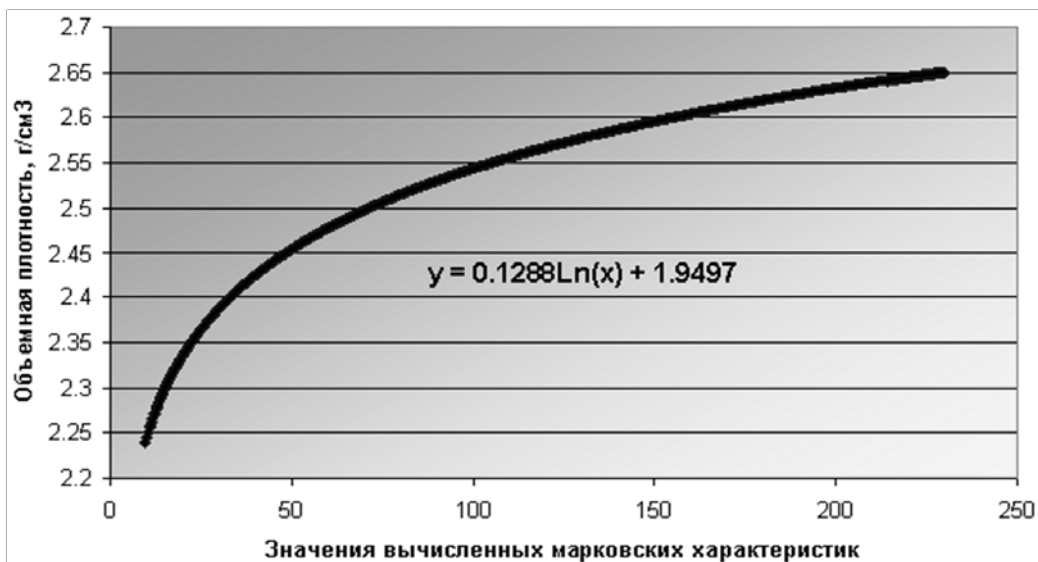


Рис. 6. Номограмма для расчета значений плотности по величине зарегистрированных марковских характеристик

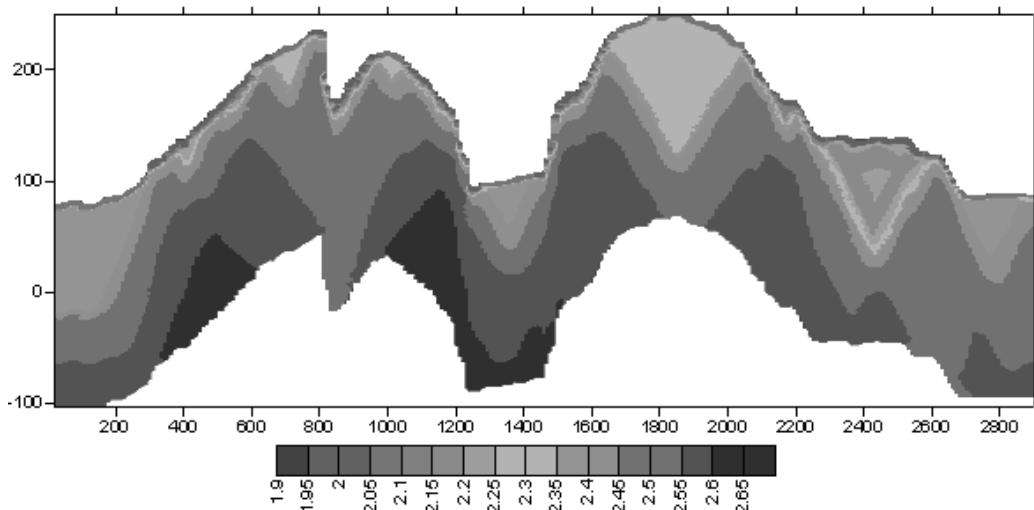


Рис. 7 Прогноз изменения объемной плотности пород в разрезе массива пород по профилю участка автомобильной трассы

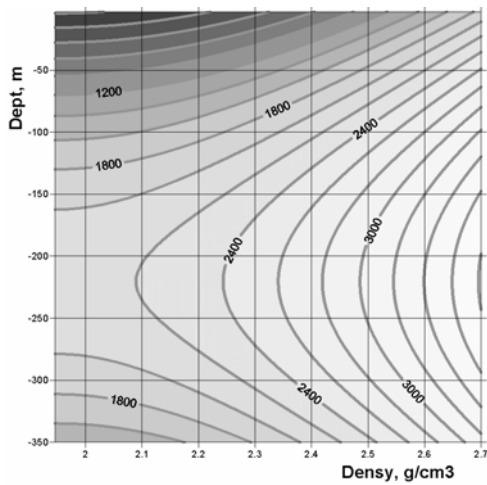


Рис. 8 Номограмма для расчета значений скорости распространения продольных волн пород по значениям их плотности и глубины залегания от дневной поверхности. Шифр кривых — скорость продольных волн м/с

зуется в плотностную с помощью регрессионной зависимости, приведенной на рис. 6.

Данная модель, основанная на изменчивости Марковских свойств, учитывает как стратиграфическую компоненту (увеличение плотности с глубиной, или правило Хильта), так и литологическую составляющую — уме-

ньшение плотности массива в зонах распространения наносов и увеличение плотности в коренных породах. На эти факторы накладывается влияние гипергенеза, область развития которого локализуется в приповерхностной зоне массива и интервалах речных долин. Рассчитанная плотностная модель массива приведена на рис. 8.

Также из рисунка видно, что наибольшая плотность проявляется в ядрах вертикально поднятых структур. Наиболее низкие значения приурочены к интервалу понижения рельефа. Однако, для антиклинальных зон наблюдается снижение плотности в осевой части, что предположительно связано с ослаблением пород в оси перегиба складки.

Более сложный вид имеет скоростная модель массива. В ней, помимо упомянутых выше составляющих, присутствует и дополнительный фактор — геостатическое давление. В упрощенном виде этот фактор контролируется относительной глубиной залегания породы. Эта модель реализуется с использованием многомерной связи приведенной на рис. 8.

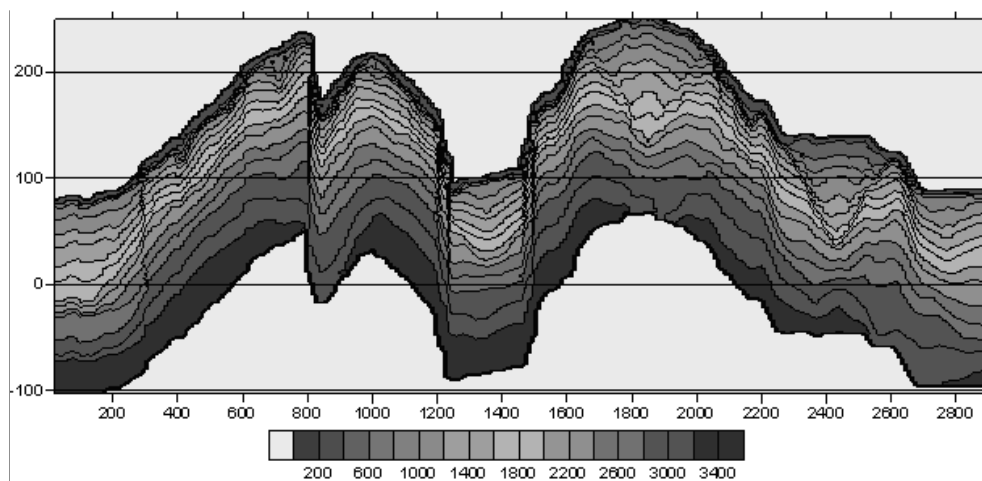


Рис. 9. Прогноз изменения значений скорости распространения продольных волн

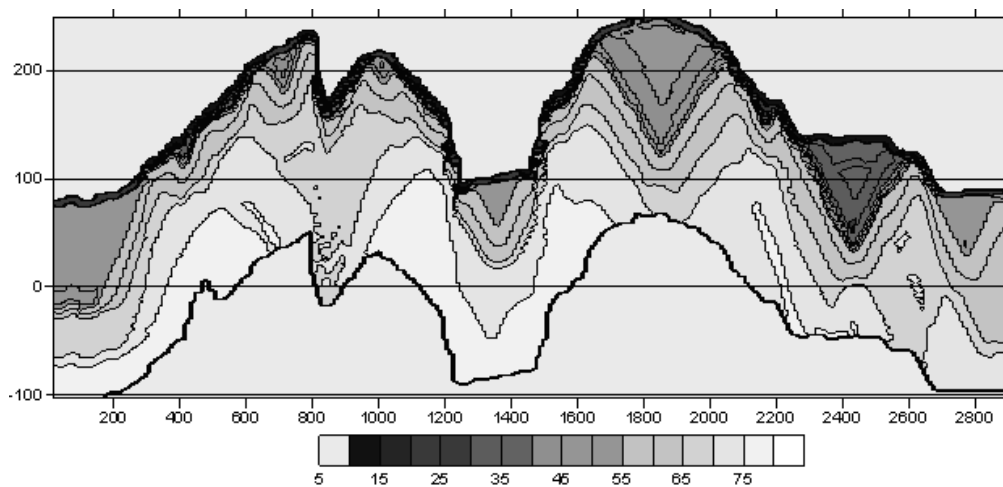


Рис. 10. Прогноз изменения значений Крепости по Протодяконову пород в разрезе массива по профилю автомобильной трассы

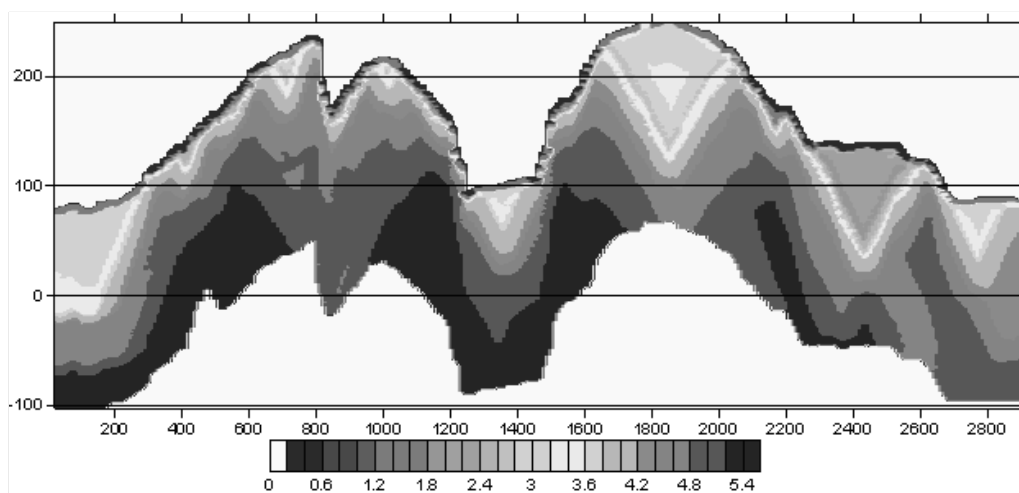


Рис. 11. Прогнозная оценка значений угла внутреннего трения пород массива по результатам Марковской гипсометрической инверсии

Рассчитанная по этой зависимости скоростная модель массива по профилю проектируемой автотрассы представлена на рис. 9.

Рассчитанные инверсионные модели плотности и скорости являются основой для расчета любых других моделей свойств массива, например прогнозные модели таких параметров как прочность пород на одноосное сжатие (бсж) и растяжение (бр), крепость по Протодяконову (f) и угол внутреннего трения

(α) и др. Две последних приведены на рисунках 10 и 11.

Априорные данные о свойствах массива, полученные дистанционно, позволяют с большей уверенностью осуществлять проектирование разведочных работ, а также могут служить основой для интерполяции фрагментированных на профиле наблюдений и интеграции разнохарактерных данных в обобщенную инженерно-геологическую модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии. — Л.: Наука, 1980.
2. Черников А.Г., Матушкин М.Б., Либина Н.В. Изучение внутреннего строения Земли на основе марковского анализа гипсометрии ее поверхности. М., «Разведка и охрана недр» № 2, 2001, с. 57—59.
3. Черников А.Г., Либина Н.В., Матушкин М.Б. Способ выявления внутренних неоднородностей Земли. Патент на изобретение. № 2004138868/28(042257) от 30.12.2004 г. **ФИАН**

Коротко об авторах

Черников А.Г. — кандидат геолого-минералогических наук, ООО «ВНИИГАЗ», e-mail: A_Chernikov@vniigaz.gazprom.ru.
Матушкин М.Б. — ООО «ВНИИГАЗ», e-mail: M_Matushkin@vniigaz.gazprom.ru.
Исаев Ю.С. — кандидат технических наук, «ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНС», e-mail: isaev45@mail.ru



ОТДЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ ПРЕПРИНТ

Бочкарев А.С., Честиков М.В.

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ И ПРИНЦИПЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ СТРАНЫ

2010. — № 3. — 19 с. — М.: Издательство «Горная книга»

Бочкарев А.С., заведующий кафедрой «Экономического анализа, бухгалтерского учета и аудита» Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики.

СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА И ПРИНЦИПЫ ОСВОЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Рассмотрены целевые установки Энергетической стратегии России» на период до 2030 г. Обоснованы сценарии развития минерально-сырьевых баз нефтяной и газовой промышленности России. Проанализированы проблемы и стратегические приоритеты развития МСБ и освоения ресурсов нефти и газа по основным Федеральным округам и акваториям страны.

Ключевые слова: углеводородные ресурсы, парадигма управления, нефтегазовый комплекс.

Bochkarev A. S. the head of a chair of «Economic analysis, accounting and audit» of the St.-Petersburg state university of service and economy.

MODERN PARADIGM AND PRINCIPLES OF DEVELOPMENT OF HYDROCARBON POTENTIAL

There are considered the purposes of Power strategy of Russia for the period till 2030y. There are proved the scenarios of development of mineral-raw-material bases of oil and gas industry of Russia. There are also analyzed the problems and strategic priorities of development of MRMB and development of oil and gas resources in the basic Federal districts and country defined water areas.

Key words: Hydrocarbon resources, management paradigm, oil and gas complex.