

УДК 550.8.013

ПОДПОВЕРХНСТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ МАРКОВСКОЙ ГИПСОТОМОГРАФИИ

Исаев Ю. С., Черников А. Г.

(ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация)

Марковська гіпсотомографія є новим способом оброблення результатів вимірювань рельєфу земної поверхні з метою вивчення і 3D-моделювання внутрішньої будови і властивостей масиву гірських порід. У статті викладено принципи розробленої методики і наводяться приклади її застосування в інженерній геології.

Markovsky gipsotomografia represents a new way of processing of results of measurements of a relief of a terrestrial surface for the purpose of studying and 3D-modelling of an internal structure and properties of a file of rocks. In article principles of the developed technique are stated and examples of its application in engineering geology are resulted.

В современных условиях ни одно линейное инженерное сооружение, будь то автомобильная или железная дорога, продуктопровод или другой протяженный объект, не может проектироваться, строиться и надежно эксплуатироваться без достоверных и полных инженерно-геологических материалов по профилю и окрестностям намеченной трассы. Особо возрастают требования к полноте и достоверности данных о подобных объектах, располагаемых в наиболее сложных геодинамических зонах, к которым относятся горные и предгорные районы.

При периодических проявлениях современной тектонической активности, динамических воздействий транспортных средств, гидро- и физических полей, коренные породы в основании сооружения по геодинамическим зонам подвергаются подвижкам. Вследствие этого возникают деформации и развиваются трещины различных направлений, что, в конечном счете, приводит к разрушению объекта. Таким образом, наиболее неблагоприятными по устойчивости и экологической безопасности являются инженерные сооружения, расположенные на участках с повышенной геодинамической активностью. Для полной или частичной нейтрализации негативных явлений на сооружениях требуется постоянное выполнение в больших объемах профилактических и ремонтно-восстановительных работ, сопровождающихся огромными затратами.

Аномалии физических полей над геодинамическими зонами, позволяют выделять их геофизическими методами. Методы инженерной геофизики обеспечивают площадной и объемный характер информации, однако, проведение наземных, особенно сейсмических работ, в горных районах не гарантирует получение качественного материала, адекватного понесенным затратам. В связи с этим возрастает роль дистанционных методов изучения массива горных пород, позволяющих до проведения полевых инженерно-геологических и геофизических работ, с минимальными затратами получать информацию о строении массива.

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.

При инженерно-геологическом изучении массива в горных районах был применен, наряду с другими, традиционными, методами исследований, и метод (способ) марковской гипсотомографии [1].

Марковские процессы, специальный вид процессов, имеющих большое значение в приложениях теории вероятностей к различным разделам естествознания и техники. Теория Марковских процессов, возникшая в 1907 г. на основе исследований математика А. А. Маркова, стала в настоящее время одним из ведущих математических инструментов при моделировании сложных динамических систем. Одна из форм марковского процесса, представляющая последовательность дискретных состояний, называется цепью Маркова. Геологические объекты и процессы, представленные в виде марковской цепи, можно описывать и моделировать с помощью матриц переходных вероятностей, при условии, что они должны обладать марковским свойством. Под термином «марковское свойство» или просто «марковость» - понимают наличие зависимости вероятности конкретного состояния от непосредственно предшествующего (или предшествующих, для цепей высоких порядков). Наиболее ярким примером проявления марковских свойств в геологии является чередование слоев литологических типов в стратиграфических последовательностях [2].

Марковская гипсометрия представляет собой новый способ построения трехмерной модели внутреннего строения геологического объекта, основой которого является изучение площадных изменений марковских свойств регулярных гипсометрических (батиметрических) отметок его поверхности [1].

Суть способа состоит в следующем. Известно, что многие природные процессы, в том числе геологические, характеризуются тем, что в них наблюдается некоторое влияние предшествующих событий на последующие, но это влияние обладает короткой «памятью» - распространяющейся только на один шаг. Однако, согласно теории марковских процессов, если мы создадим такое условие, при котором вероятность следующего перехода будет зависеть более чем от одного события, то область влияния предыдущего состояния будет расширена. К примеру, таким добавочным условием может быть изменение длины марковской последовательности и, увеличивая длину последовательности, описывающей изменчивость марковости свойств поверхности, мы получим информацию о более удаленных событиях.

Описываемый способ изучения глубинного строения массива горных пород базируется на предположении о наследовании марковских свойств рельефа в марковских свойствах поверхности перекрывающих наслоений.

С позиций геологии это предположение заключается в следующем. Пусть имеется несколько последовательно залегающих слоев (толщ), контрастных по геолого-геофизическим свойствам. Границы разделов слоев обладают рельефом, последовательно сформированным 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 горизонтальных профилей, проложенных на плоскости границы. 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 [2]. 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 рельефа на дневной поверхности, представляется возможным решить обратную задачу - извлечь информацию о изменении марковских свойств с глубиной, а следовательно и о глубинном строении массива.

Для реализации этой идеи используются результаты регистрации измерений свойств на дневной поверхности, преобразованные в числовую последовательность, и система обработки, позволяющая выполнять прогноз (зондирование) строения массива путем марковского преобразования измеренных свойств как по профилям, так и по площадям наблюдений.

Получение томографических моделей осуществляется путем выполнения компьютерного анализа числовых последовательностей марковских состояний значений рельефа в двух подвижных окнах - АВ и MN. В интервалах окон замеренные величины преобразуются в значения переходных вероятностей случайной марковской последовательности. Сравнивая серии значений в двух

окнах в последовательных «пикетах» исследуемого профиля рассчитываются серии кривых, отражающих изменения марковских свойств рельефа глубинных горизонтов, которые впоследствии преобразуются в куб данных.

Используя результаты математического моделирования, рассчитываются «поля» влияния марковских свойств гипотетического множества границ раздела в плоскости геологического пространства на марковские свойства единичного отрезка находящегося на дневной поверхности.

Приведенный на рис. 1. пример соответствует уровню 2D-моделирования. Для получения трехмерной модели геологического объекта осуществляется единовременная обработка гипсометрического поля на всей поверхности исследуемого объекта, представленного в виде регулярной решетки в координатах X и Y с значениями абсолютных отметок высот в ее узлах.

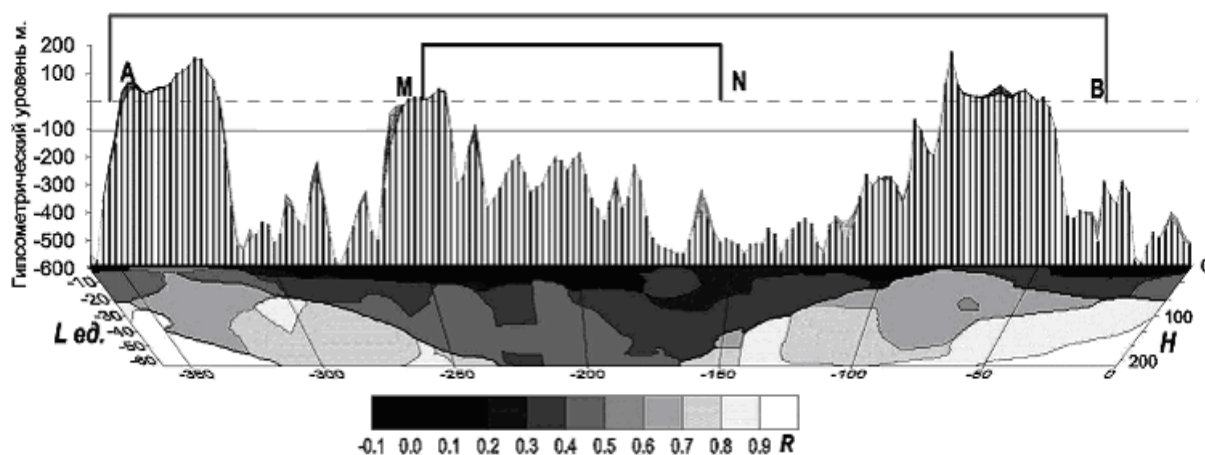


Рис. 1. Пример марковского профилирования гипсометрического поля и получаемая томограмма. Схема виртуальной установки АВ MN марковского зондирования, рельеф земной поверхности и получаемая томограмма. Частота $F = 2$

3D-модель рассчитывается на основании томографического прогноза изменчивости марковских свойств на различных глубинах от земной поверхности. Моделирование осуществляется с помощью специально разработанного алгоритма, использующего математический аппарат марковских процессов с нечеткими ка-

налами наблюдения и реализующим свойства нелинейности, при-
 сущие геологическим объектам и процессам. Данный алгоритм,
 в отличие от традиционных моделей, формирующих модель в ви-
 де совокупности координатных точек объекта, формирует образ
 объекта, в котором все элементы – пространство и его свойства
 тесно связаны друг с другом и образуют единую Систему. На
 рис. 2 приведена схема элементов программной реализации алго-
 ритма и последовательность выполняемых операций, завершаю-
 щаяся построением томографического разреза.

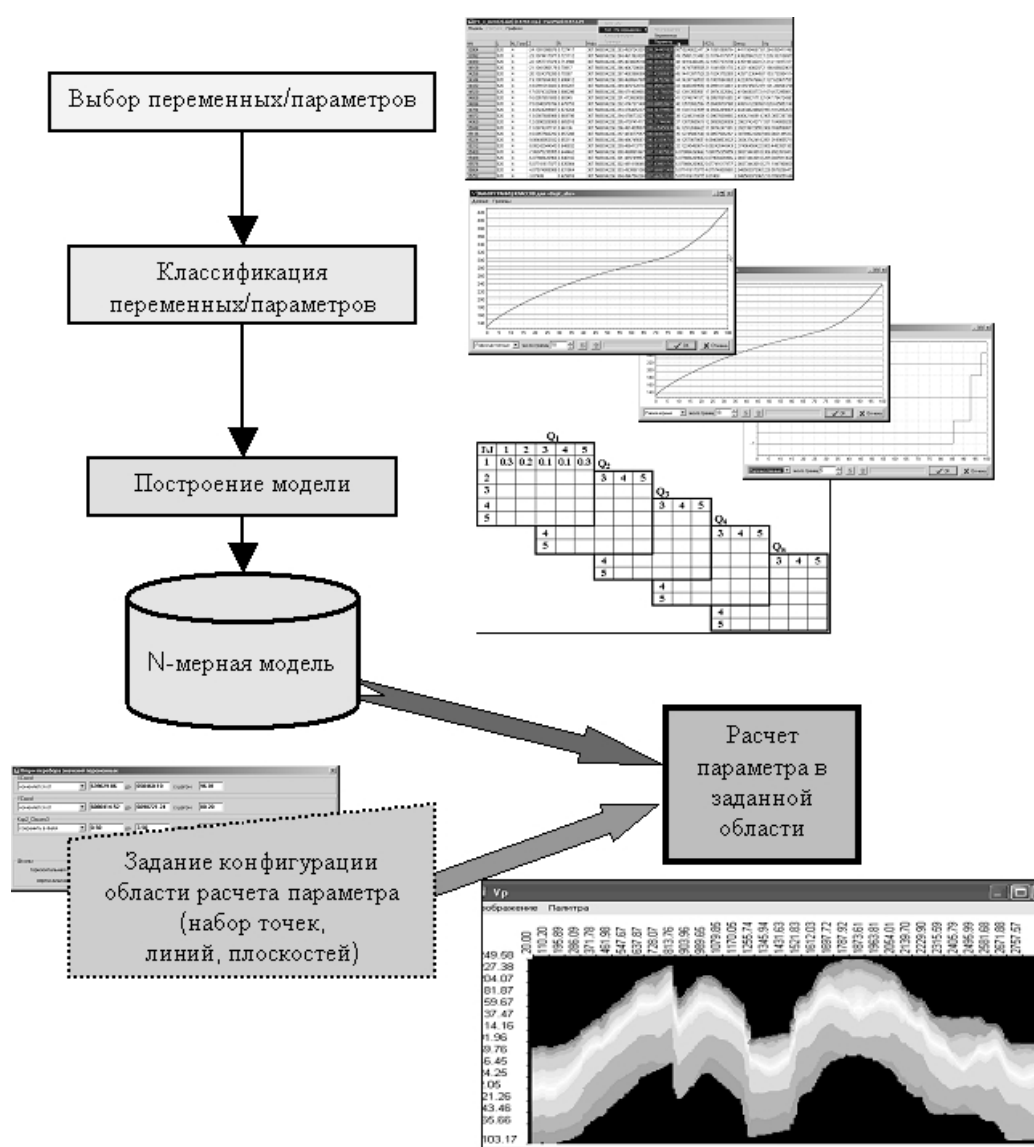


Рис. 2. Последовательность операций при марковском моделировании нелинейных N-мерных геологических Систем

Разработанная методика была использована при проведении наземных инженерно-геологических исследований на участках проектируемых подземных объектов, подлежащих заложению в условиях сильно расчлененного рельефа. Применение традиционных геофизических методов в таких условиях оказалось малоэффективным.

Основой для прогнозирования строения МГП в гористой местности послужила цифровая гипсометрическая карта района проектируемой трассы.

Первоначально, поверхность участка описывалась в виде регулярной сетки, в узлах которой определены гипсометрические отметки. Расстояние между узлами принято равным 0.01км., перепад высот – порядка 400 метров (рис. 3).

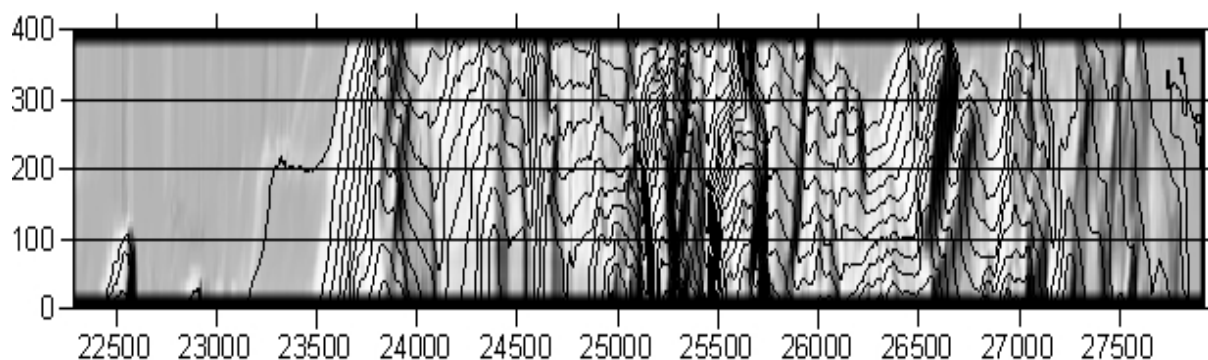


Рис. 3. Рельеф поверхности на инженерно-геологического объекта, подлежащего исследованию и моделированию методом гипсотомографии

На следующем этапе выполнялась установка параметров зондирования – выбор уровней дискретизации марковских состояний рельефа и длин марковских последовательностей. Эта операция обеспечивает оптимизацию параметров модели, т.е. приемлемое соотношение таких противоречивых характеристик модели, как глубина зондирования и детальность выполняемого прогноза.

По результатам анализа гипсометрии была рассчитана 3-х мерная модель строения массива размером 5600×400×400 метров. Модель позволяет строить томограммы в 3-х ортогональных проекциях. На рис. 4 приводятся томограммы, рассчитанные по про-

филям, проложенным вдоль прямоугольного участка, с интервалом 100 метров.

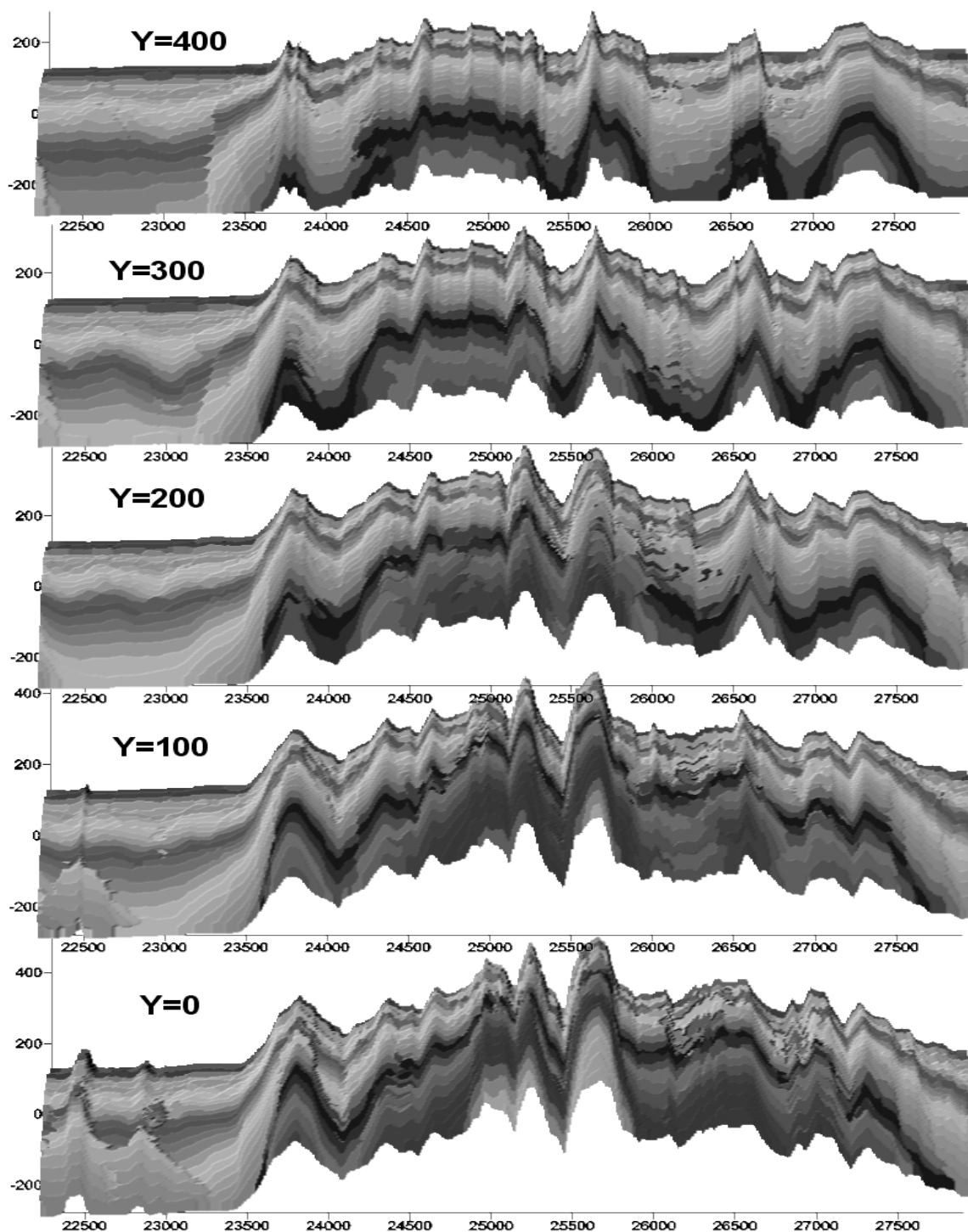


Рис. 4. Подповерхностное строение горного массива по данным марковской гипсотомографии. Расположение профилей изображено на рис. 3

На рис. 5 представлена модель в виде рельефа поверхности, пересеченного по профилю $Y = 100$, вертикальной плоскостью рассчитанной томограммы.

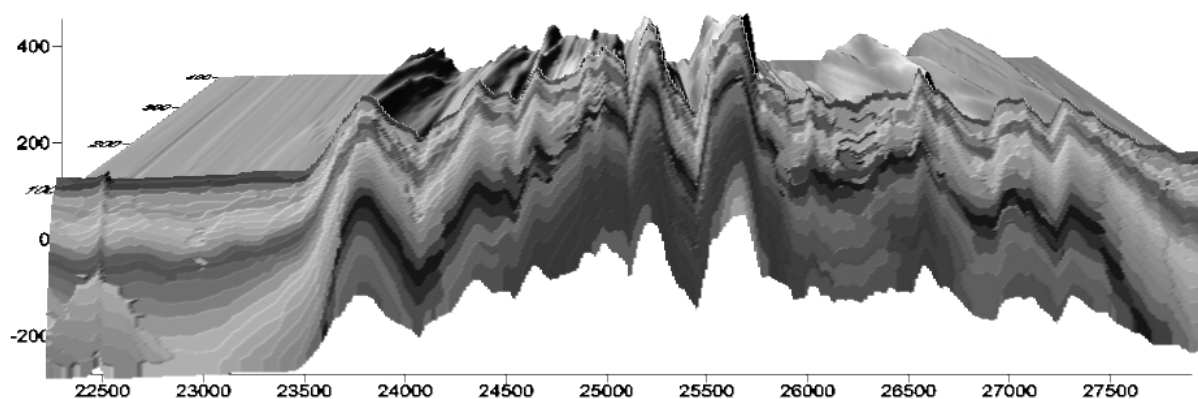


Рис. 5. Пример прогнозируемого томографического разреза, сопоставленного с пересекаемым рельефом

Рассчитанные поля изменчивости марковских свойств использованы также для прогнозирования (выявления) в разрезах различных типов несогласия, выражающихся в изменении марковских свойств и обусловленных тектонической нарушенностью (рис. 6).

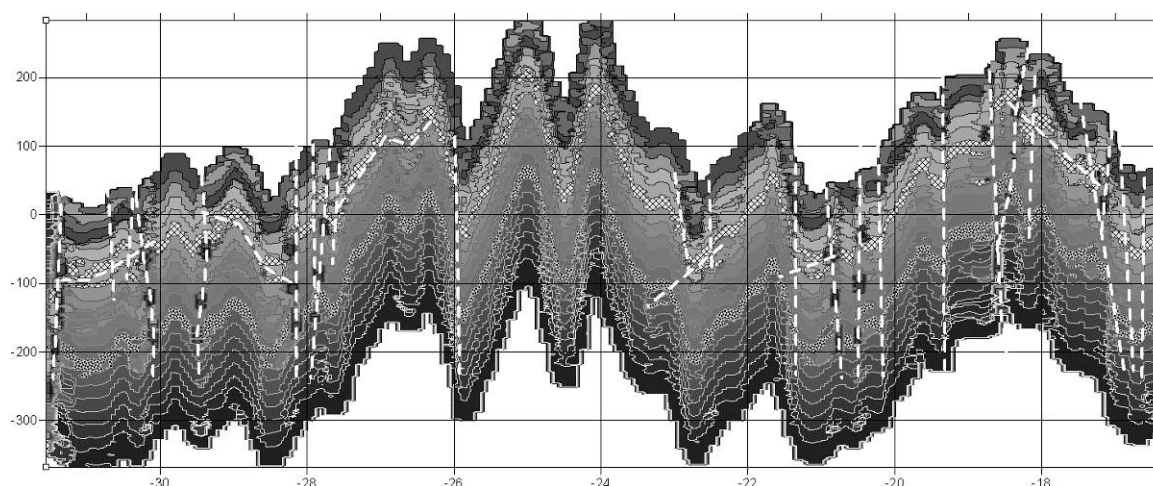


Рис. 6. Распределение аномальных зон на томограмме массива, вызванных нарушением однородности распределения измеренных Марковских характеристик

На томограмму нанесены пунктиром прогнозируемые тектонические нарушения. Нарушения трассировались интерактивно по визуально наблюдаемым срывам корреляционных линий – маркирующих горизонтов. На разрезе выделялись наиболее очевидные нарушения, однако можно сделать предположение о более значительном их количестве.

Помимо оценки нарушенности массива, марковская гипсо-томография позволяет выполнять прогнозирование петрофизических характеристик пород методом марковской гипсометрической инверсии.

Марковская гипсометрическая инверсия – это вычислительный процесс, в котором на основе полученных томограмм и некоторой априорной информации 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:

$$P1 = \sum_{j=1}^N R_j \times W_i + n_i,$$

где R_j – Коэффициент контрастности среды, W_i – Марковский идентификатор, n_i – помеха.

В этом случае инверсию можно рассматривать как обратную задачу, заключающуюся в нахождении R_j через значения идентификатора и изоморфной (с сохранением всех математических свойств) подменой их значениями других параметров, характеризующих свойства моделируемого объекта. Для решения этой задачи используются различные способы, практикуемые при петрофизическом моделировании. Наиболее популярные, это методы и алгоритмы регрессионного анализа и распознавания образов.

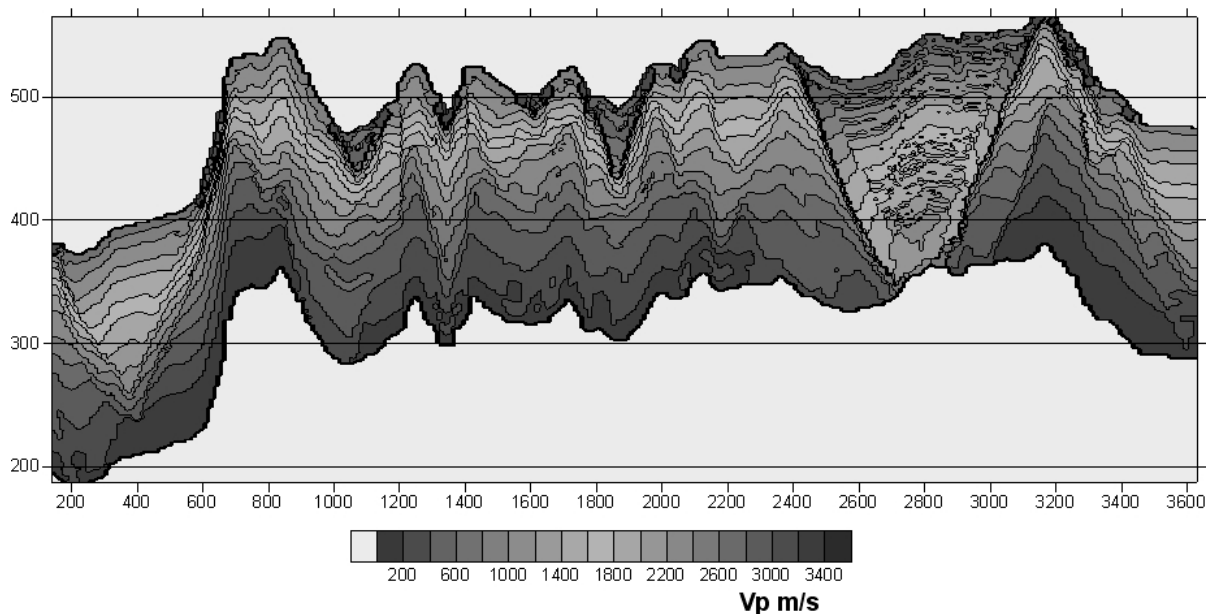


Рис. 7. Пример представления томограммы массива в виде скоростного разреза

Используя наработанные петрофизические связи (геофизических характеристик с физико-механическими характеристиками горных пород), возможно выполнить дистанционный прогноз механических свойств горного массива. На рис. 8 представлен пример дистанционного прогноза прочности на сжатие.

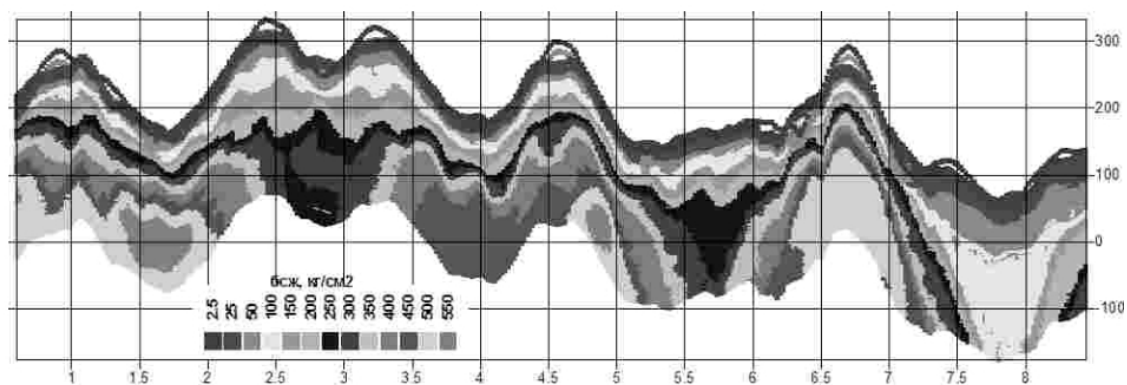


Рис. 8. Прогноз изменчивости прочности (предела прочности на одноосное сжатие) пород в массиве

Все приведенные в статье результаты марковского моделирования строения массива горных пород выполнены по материалам, содержащимся на топографических электронных картах ин-

женерно-геологических объектов. Для получения более детального и достоверного инженерно – геологического прогноза необходимо проведение комплексного анализа с привлечением детальных данных комплекса наземных и скважинных геофизических исследований, и особенно детальных инженерно-геологических материалов. Априорные данные, 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 ССЫЛОК

1. 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.
2. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии. Л. Наука, 1980.
3. Черников А.Г., Матушкин М.Б., Исаев Ю.С. Новый способ дистанционного прогнозирования инженерно-геологических характеристик сложных геодинамических объектов. ГИАБ, № 7, 2010, С. 177 – 186.