

АППРОКСИМАЦИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОСЛОЖНЕННЫХ РАЗРЫВАМИ

В. В. Лапковский

(Институт геологии нефти и газа СО РАН)

В. В. Лапковский

Разрывные нарушения геологических границ существенно затрудняют создание и преобразование их компьютерных моделей на основе использования числовых методов аппроксимации функций двух переменных. Автором предложен технологически эффективный аппарат на основе аппроксимации сплайнами, выраженными через функции Грина. Учет разрывов поверхности происходит либо путем вычисления дизъюнктивной компоненты аппроксимируемой поверхности, либо с помощью изменения вычисления функций Грина. Рассмотрены также особенности учета разрывных нарушений при преобразовании числовых моделей на прямоугольных сетках – сглаживания и вычисления дифференциальных форм.

Геологические тела могут иметь разрывы, и это существенно осложняет применение большинства классических методов аппроксимации и трансформации их числовых моделей. Данная проблема имеет уже солидную историю и некоторый набор средств ее решения [1–3]. Большинство современных интегрированных пакетов, предназначенных для моделирования геологических бассейнов или отдельных границ (LandMark, Integral, 2d/3d Pack и др.), предлагают инструменты работы с разрывными поверхностями. При этом используются различные алгоритмы учета разрывов:

1. Если известны амплитуды относительного перемещения блоков вдоль линий разрывов, то результирующую поверхность можно получить как сумму дизъюнктивной и пликвативной компонент. Наиболее простой случай для вычисления дизъюнктивной компоненты – поверхность разбита разломами на серию изолированных блоков, в каждом из которых амплитуда перемещения постоянна. Алгоритмы, реализующие такой подход, как правило, достаточно быстры, во всяком случае, число разломов не является для них серьезным препятствием. Серьезным ограничением их применения зачастую является отсутствие информации о характере смещений по разломам. Некоторые затруднения здесь связаны также с существованием разрывов с переменными амплитудами смещений, вплоть до затухающих разрывов.

2. Если структура разрывов позволяет разделить область построения модели на серию изолированных блоков. В каждом из блоков возможна аппроксимация поверхности непрерывной функцией. Серьезным препятствием в реализации данного подхода является наличие затухающих разломов. Для этого случая в рамках аппроксимации геологических гра-

ниц с помощью В-сплайнов А. М. Волковым [1] предложено использовать различные виды граничных условий на линиях разрывов. Формально выделено 4 вида разрывов (разрыв функции и первых производных, разрыв функции без разрыва производных, разрыв производных без разрыва функции, непрерывность функции и первых производных). Используя эти граничные условия, все-

гда можно дополнить реальную структуру разрывов фиктивными, чтобы разбить карту на серию изолированных блоков. С точки зрения качества получаемых моделей это один из лучших алгоритмов, к тому же он оказался применим и для случаев с наклонными плоскостями смещения разрывов [2]. Однако для моделирования сложных объектов, содержащих десятки разрывов, процесс задания фиктивных разломов и граничных условий на линиях всех разломов представляется несколько затруднительным.

3. Модель строится поточечно с анализом взаимного расположения исходных данных относительно линий разрывов. Такой алгоритм использован в широко известных пакетах Surfer 7,8, ArcView и ряде других. Разрывы в этом случае представляют собой барьеры, через которые не проникает влияние исходных точек. Этот алгоритм достаточно универсален в том плане, что разрывы могут совершенно произвольно располагаться в области построения модели и от интерпретатора не требуется дополнительных знаний об их природе. Однако он имеет существенные технологические ограничения – время построения модели линейно зависит от числа разрывов поверхности. Для реальных ситуаций, скажем построения моделей по сейсмическим данным, это означает минуты при наличии нескольких разломов и часы или десятки часов для сотен разломов даже при вычислениях на весьма производительных компьютерах. Кроме того, поверхность теряет целостность, выглядит мозаично, при этом невозможно представить ее морфологию в изначальном состоянии. Имеется в виду следующее: если мы имели некоторое поднятие, свод которого был осложнен серией разломов, то общая направленность изолиний по разные стороны от разломов должна сохраниться

и наследоваться от исходной поверхности. При поточечном построении этого, как правило, не происходит.

Автором предложены оригинальный алгоритм и его технологическая реализация, которая естественно укладывается в рамки подходов, принятых в Институте нефти и газа к построению региональных и локальных карт на основе разнородной информации [4]. Эти технологии позволяют строить карты, содержащие сотни и тысячи фрагментов разрывов, на сетках большого размера (до нескольких тысяч строк и столбцов), как при незначительном числе исходных данных (например, данные бурения), так и при огромном числе данных (данные сейсморазведки – порядка сотен тысяч исходных значений). При этом время создания и преобразования сложных моделей не превышает 5...10 мин на РС с хорошей производительностью. В статье представлены иллюстрирующие результаты применяемых технологий лишь на одном объекте, хотя они широко используются при построении и оценке моделей реальных геологических объектов в Восточной и Западной Сибири.

Аппроксимация поверхностей

Для построения моделей поверхностей в качестве основы использовались двумерные интерполирующие и сглаживающие сплайны, выраженные через функции Грина. Для непрерывных поверхностей постановка и решение задачи изложены В. А. Василенко [5], и применительно к двумерному случаю постановка задачи состоит в следующем.

В двумерной ограниченной области Ω на множестве хаотически расположенных точек P_1, P_2, \dots, P_n известны значения функции r_1, r_2, \dots, r_n . Задача нахождения интерполирующего сплайна с интегрируемыми в квадрате вторыми производными сводится к нахождению такой функции σ , чтобы $\sigma(P_i) = r_i$ для $i=1, 2, \dots, n$ и чтобы при этом минимизировался функционал

$$I_2(\sigma) = \int_{\Omega} \left[\left(d^2 \sigma / dx^2 \right)^2 + 2 \left(d^2 \sigma / dx dy \right)^2 + \left(d^2 \sigma / dy^2 \right)^2 \right] \times d\Omega.$$

Физический смысл задачи сводится к следующему: как при минимальных затратах усилий на преодоление упругости поверхности изогнуть ее так, чтобы она прошла через все заданные точки. Решением является двумерный аналог интерполирующего кубического сплайна.

Нахождение сглаживающего сплайна удовлетворяет условию минимизации функционала

$$I_2(\sigma) + R \sum_{i=1}^n [\sigma(P_i) - r_i]^2,$$

где R – параметр, определяющий силу сглаживания (при больших R сплайн приближается к интерполирующему, при малых – к плоскости).

И интерполирующий, и сглаживающий сплайн представляется через функцию Грина $G_{2,2}$ соответствующего оператора

$$\sigma(P_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i G_{2,2}(P - P_i) + v_{00} + v_{10}x + v_{01}y,$$

где x, y – координаты, а

$$G_{2,2}(P - P_i) = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \ln[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2],$$

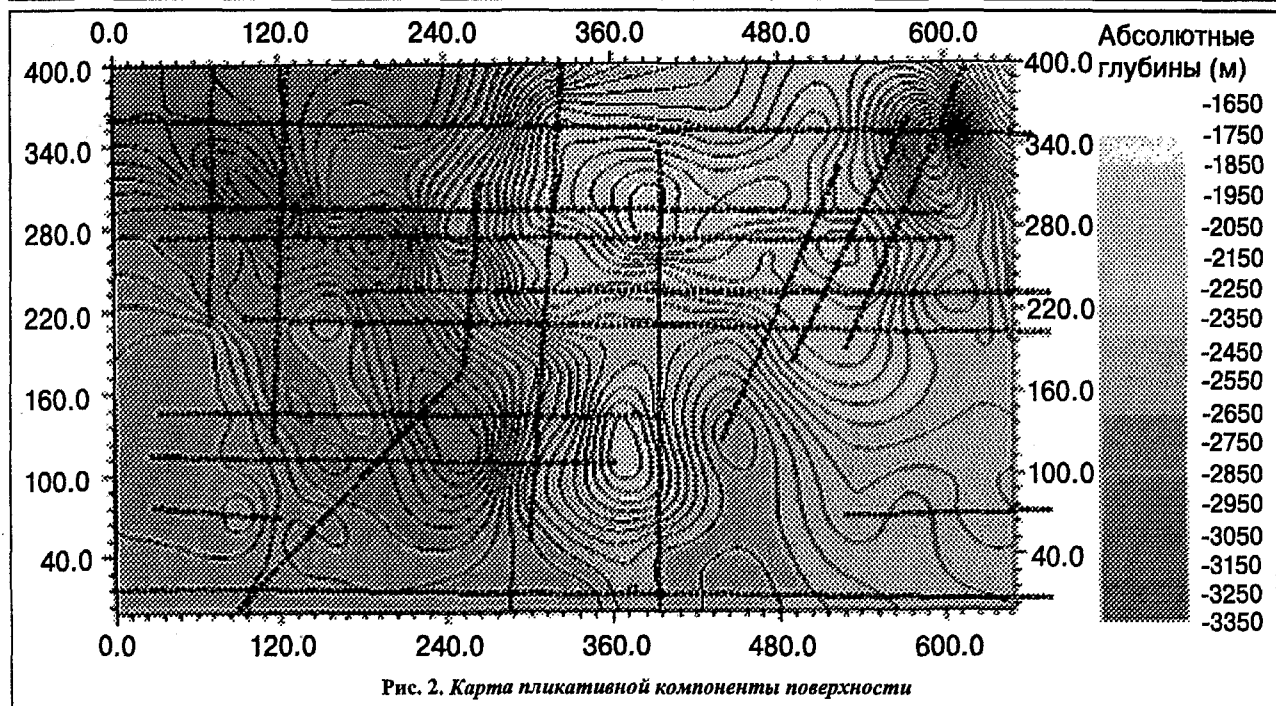
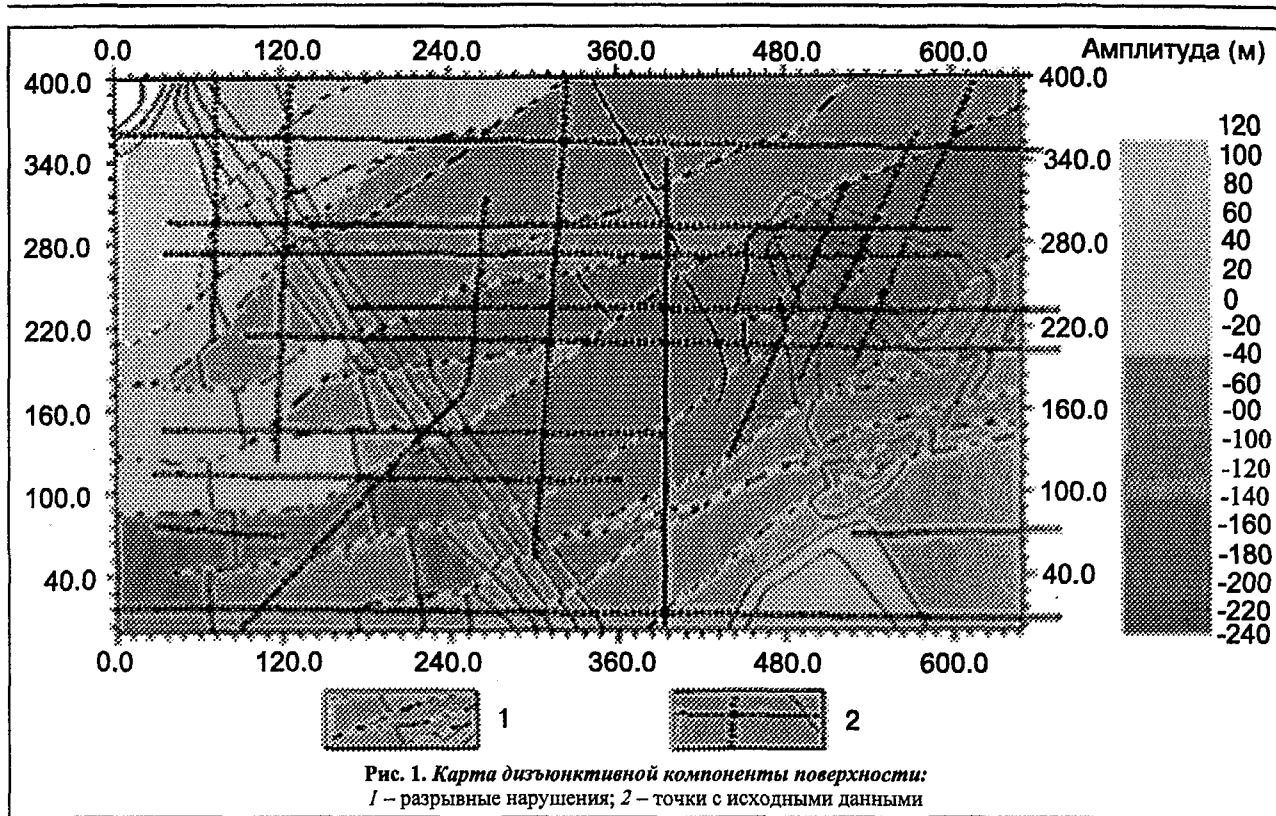
здесь x, y – координаты точки P , а x_i, y_i – координаты точки P_i .

Неизвестные коэффициенты $\lambda_i, v_{00}, v_{10}, v_{01}$ находятся благодаря решению системы линейных уравнений (уравнение 2.115 в работе [5]). Поясним теперь, как этот аппарат был адаптирован для ситуации, когда поверхность осложнена разрывами. Возможны три разные ситуации:

- 1) вдоль линий всех разрывов задана амплитуда перемещения правого крыла относительно левого;
- 2) известны только положения разрывов на плоскости, а амплитуды не заданы;
- 3) для некоторых разрывов амплитуды известны, для остальных нет.

В первом случае картируемая поверхность представляется как сумма дизъюнктивной и пликативной компонент. В соответствии с этим сначала строится карта амплитуд перемещений, затем полученные амплитуды удаляются из исходных данных. Таким образом, в данных остается только непрерывная – пликативная – компонента, для которой строится интерполирующий или сглаживающий сплайн. Затем обе компоненты суммируются в узлах регулярной сетки. Результаты подобных вычислений представлены на рис. 1–3. В ряде случаев, когда изначально амплитуда не задана, она может быть вычислена в отдельных точках на линии разрыва. Например, если имеются данные, организованные по профилям, что типично для сейсмических данных, то амплитуду можно установить по значениям, взятым с соседних трасс, лежащих по разные стороны от разрыва.

Для второй ситуации была использована идея барьеров. Однако в нашем подходе барьеры не являются абсолютно непроницаемыми. Они ослабляют взаимное влияние точек, расположенных по разные стороны от них, но не исключают его полностью. Не вдаваясь в детали реализации, отметим, что этот процесс можно представить и как некоторое изменение способа формирования исходной матрицы, состоящей в основном из значений функции Грина для пар исходных точек на плоскости. Результат построения карты изолиний в ситуации, когда амплитуды разрывов изначально не были заданы и не вычислялись, представлен на рис. 4. За счет того, что сплайн строится целиком на всю область и потом его значения вычисляются в узлах регулярной сети, производительность алгоритма мало зависит от числа разломов и числа узлов регулярной сети.



В третьей ситуации по разломам с заданными амплитудами строится дизъюнктивная компонента. Затем эти разломы удаляются из общего набора (они уже учтены). Далее строится карта с оставшимися разломами, которые представляются как полупроницаемые барьеры, после чего обе карты суммируются.

Представленные карты позволяют сделать определенные выводы об эффективности предложенных решений. Лучше с точки зрения геолога выглядит результат, полученный на рис. 3. На этой карте замет-

нее проявилось подобие контуров структур, осложненных последующими разломами. Это вполне естественно, так как при ее построении учитывалось больше информации – амплитуды относительного перемещения. Однако на обеих картах видны выигрышные стороны примененного алгоритма аппроксимации:

1. Хотя поверхность и разбита амплитудными разрывами, она выглядит целостной – резких изменений направлений контуров изолиний на границах разрывов не происходит.

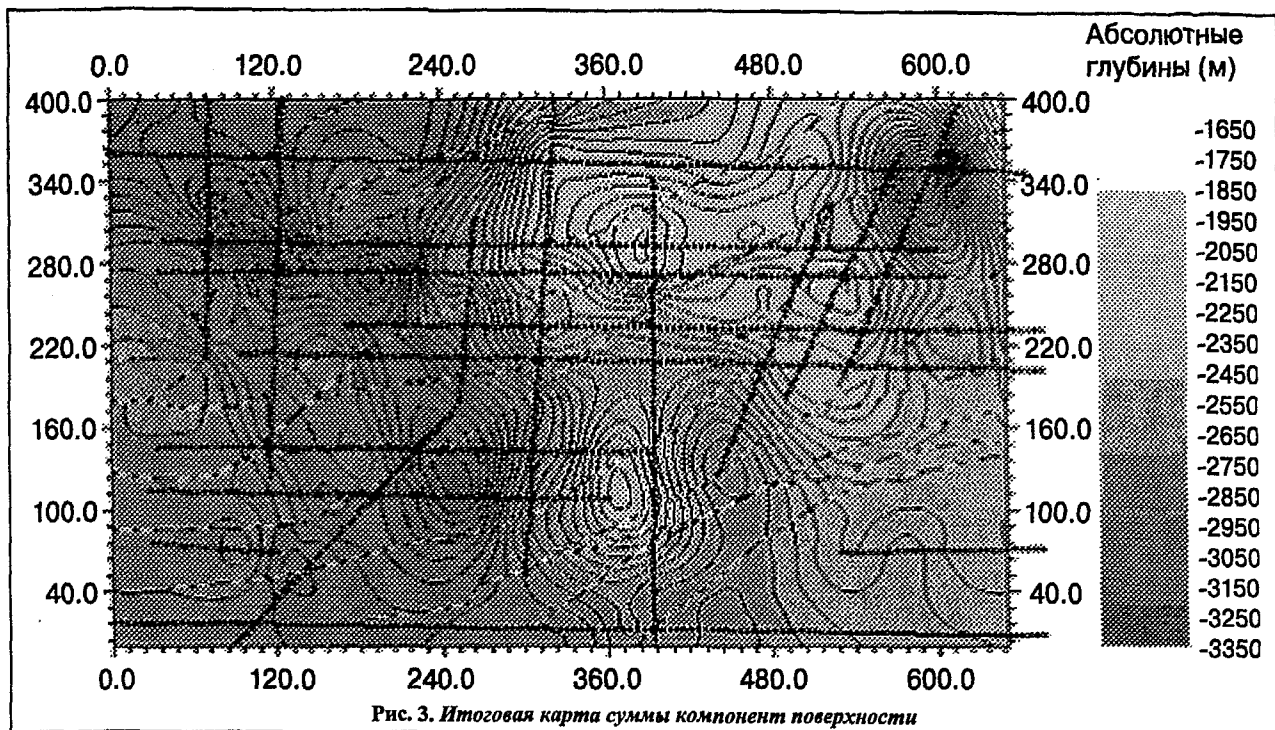


Рис. 3. Итоговая карта суммы компонент поверхности

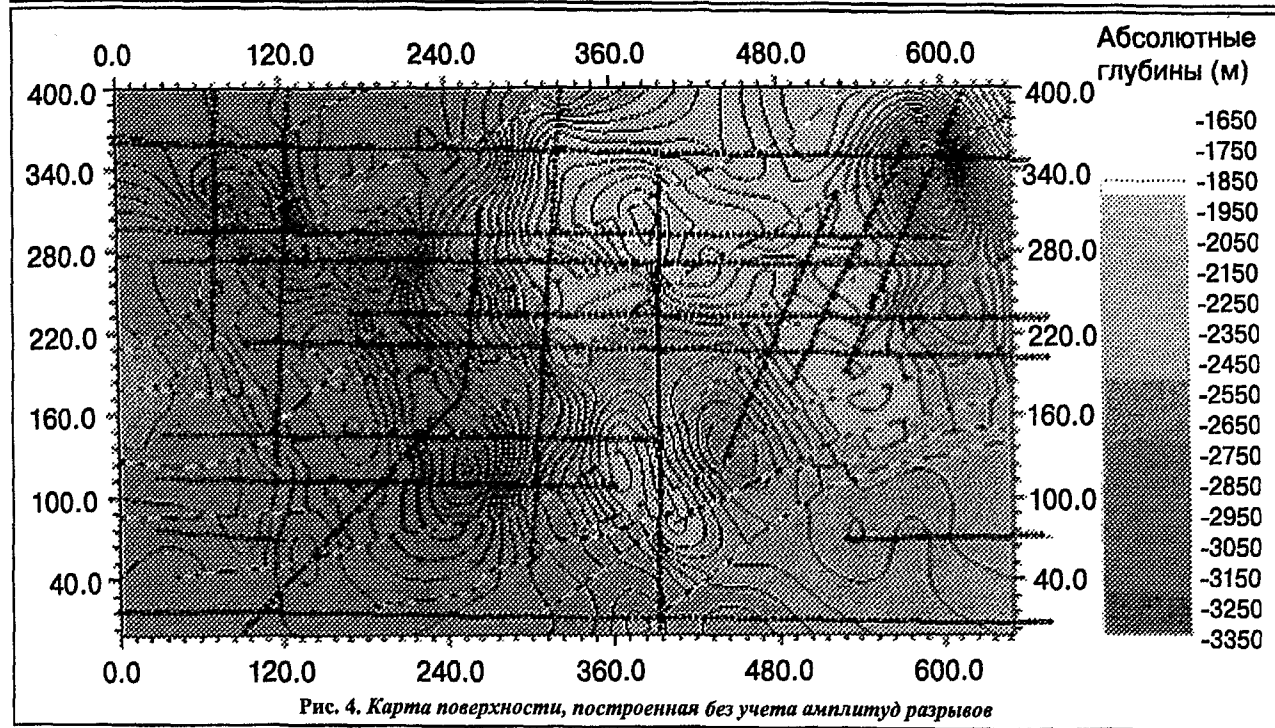


Рис. 4. Карта поверхности, построенная без учета амплитуд разрывов

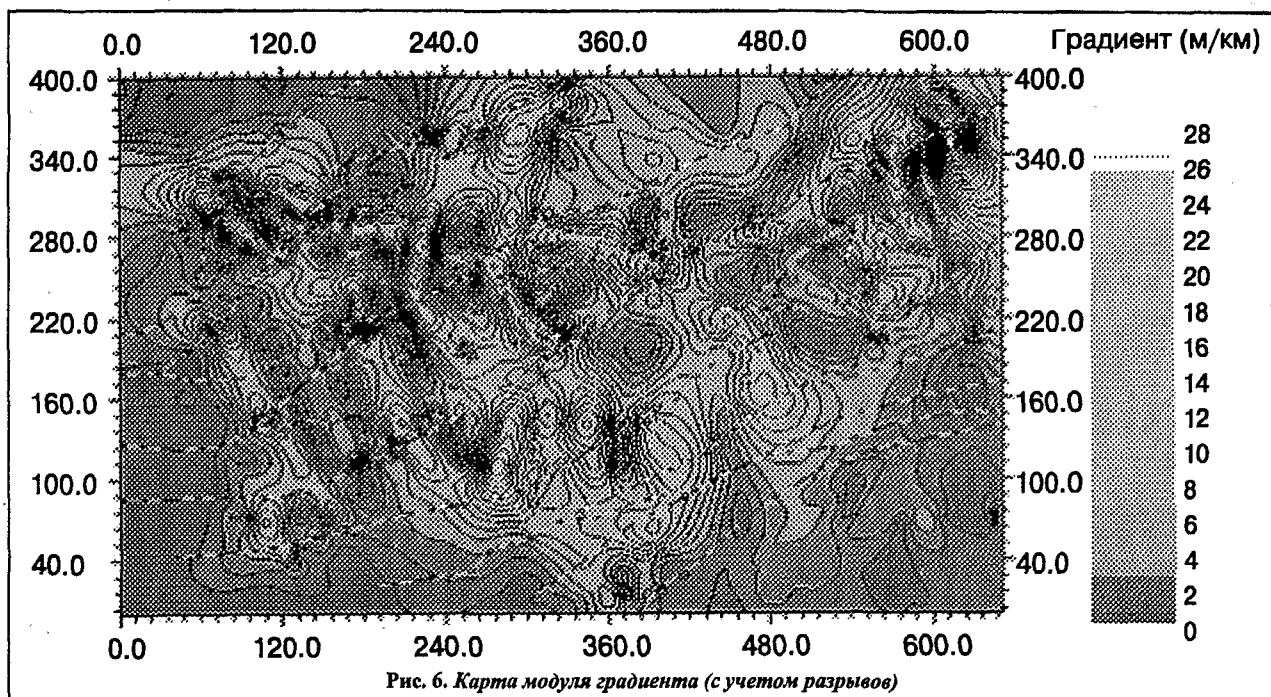
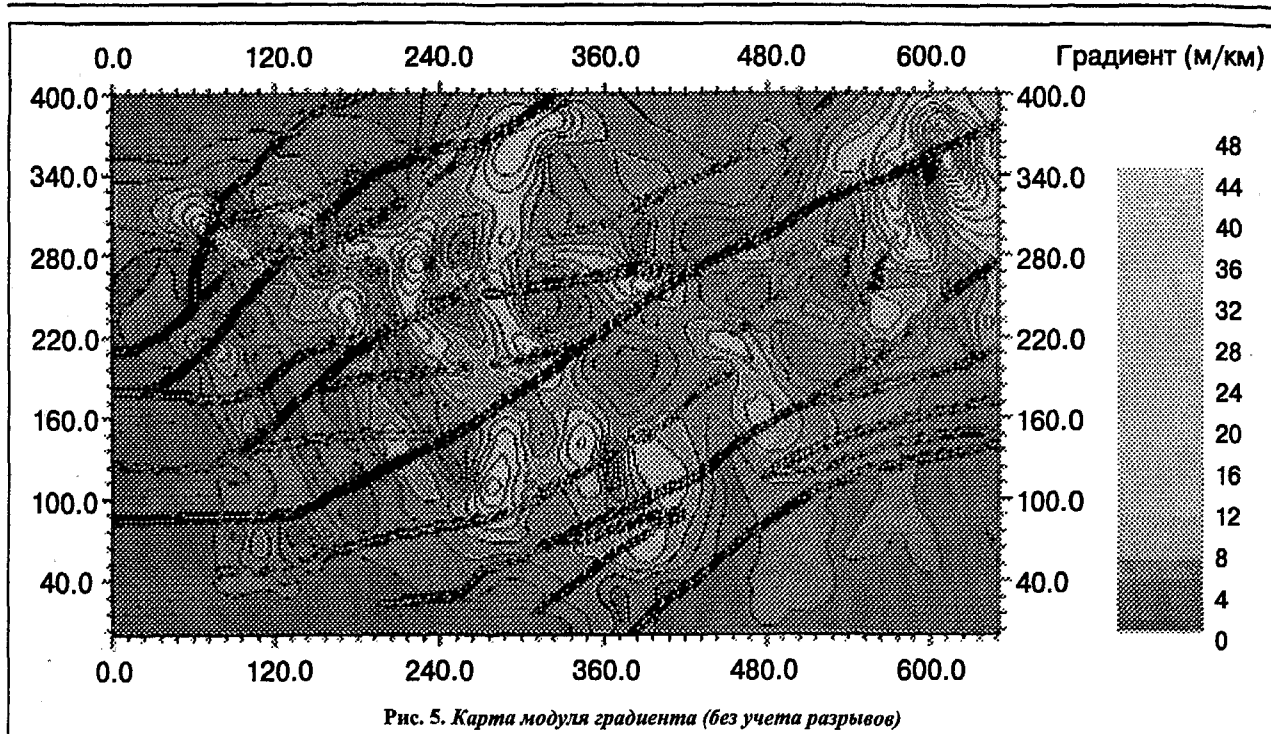
2. Даже в ситуации недостатка или полного отсутствия исходных данных в блоке (правый нижний фрагмент любой из карт рис. 3, 4) удается построить модель, которая неплохо согласуется с соседними участками карты. Это достигается за счет определенной «прозрачности» разломов.

3. Структура поверхности не связана со структурой исходных данных в том плане, что нет явных особенностей карты, повторяющих направления профилей или их пересечения.

При количестве исходных данных порядка 1400, общем числе линейных отрезков на линиях всех раз-

рывов порядка 300 и размере регулярной сети числовой модели 521 на 321 узел вычисление этого примера на компьютере с хорошей производительностью не превышает 5 мин.

Этот же алгоритм (с некоторыми дополнениями) был использован и для сейсмических данных с числом исходных точек 400 тыс. и более и размером строящейся модели более 1000 на 1000 узлов. При этом время счета не возрастает в разы. Достигнуто это следующим образом. Существенное ограничение, которое необходимо обходить при построении сплайна, — число исходных точек. При решении системы



линейных уравнений приходится обращать плотную матрицу, ранг которой равен $n+3$ (n – число исходных точек). Соответственно затраты памяти растут примерно пропорционально n^2 , а время вычисления – n^3 . Ясно, что уже при числе исходных данных порядка 10000 задача не проходит ни по ограничениям памяти, ни по ограничениям разумного времени выполнения. Для этих ситуаций реализовано следующее решение. Строится сплайновая модель с учетом всех разрывов на основе некоторого ограниченного числа данных – случайная выборка из исходных данных 500...1500 точек, которая позволяет быстро создать

числовую модель в нулевом приближении. Затем эта модель уточняется по всем имеющимся данным. Здесь используем быстрые (не сплайны) локальные алгоритмы аппроксимации, работающие без учета разрывов. Один из этих быстрых алгоритмов, реализованный в данной технологии, относится к разностным методам на прямоугольных сетках, другой – скользящее среднее со встроенной весовой функцией. Первый хорошо проявил себя в ситуациях, когда отсутствуют существенные невязки между профилями, второй позволяет эти невязки частично сглаживать.

При построении моделей поверхностей геологических объектов их приходится различным образом трансформировать – сглаживать, вклеивать фрагмент одной модели в другую, делать какие-то логико-арифметические преобразования, вычислять различные дифференциальные формы. Некоторые процедуры преобразования числовых моделей поверхностей, которые для непрерывных и гладких границ реализуются более или менее стандартно, могут иметь различные трактовки и реализации для поверхностей с разрывами. Общая идеология, которой следуем при работе с разрывами, простая – если разрыв существует на исходной поверхности, то он должен сохраниться и на производной. Во всех вычислительных процедурах разрыв являлся непроницаемым барьером. То есть если разрыв разделяет соседние узлы регулярной сетки, они друг друга «не видят» и одновременно в вычислениях не участвуют. Этот принцип соблюдался при выполнении таких операций, как сглаживание поверхности, восполнение на участках отсутствия информации, изменение параметров регулярной сети и дифференциальных преобразований. В качестве иллюстрации остановимся более подробно на последних преобразованиях.

При анализе структуры геологических поверхностей большое значение имеет вычисление дифференциальных форм – производных, модуля градиента, кривизны, оператора Лапласа, энергии изгиба. Одна из первых работ, в которой для геологической интерпретации геометрических свойств поверхностей слоев использованы дифференциальные формы, принадлежит М. Д. Белонину и И. М. Жукову [6]. В подобных процедурах можно либо игнорировать разрывы, как будто их не существует, либо каким-то образом учитывать. Представляется, что игнорировать разрывы – не очень хорошее решение. Допустим, имеется реальная геологическая граница, терпящая разрыв с амплитудой 100 м. Конечно, можно проигнорировать этот разрыв при вычислении модуля градиента поверхности. Тогда получаемые значения будут зависеть от шага регулярной сети. Так, значение 0,1 получим при шаге сети 1000 м, а значение 5 – при шаге 20 м. Вряд ли нас устроила бы вычислительная процедура оценки толщины слоя или его пористости, которая давала бы результаты, отличающиеся в десятки раз в зависимости от параметров выбранной регулярной сети. Можно отказаться от вычисления дифференциальных характеристик в узлах, непосредственно примыкающих к разрывам. Но тогда рискуем получить большие белые пятна на картах, построенных для участков со сложной тек-

тоникой. Исходя из этого процессы вычисления соответствующих дифференциальных форм были реализованы на основе узлов, находящихся по одну сторону от разрывов (либо справа, либо слева).

В качестве примера на рис. 5 показаны результаты вычисления градиента без учета разрывов поверхности (исходной поверхностью служила модель с рис. 3). На рис. 6 показана аналогичная карта, но построенная с учетом разрывов. Несомненно, более информативной и предпочтительной является последняя. Там, где разломы реально существуют, но они игнорировались при вычислении дифференциальных характеристик, разрывы забирают в себя значительную долю аномалий карты, уменьшая их относительную контрастность вне зон разломов. И если на карте модуля градиента это не столь выражено, то для карт других дифференциальных форм – кривизны, энергии изгиба этот эффект проявился еще более отчетливо: контрастные аномалии трассируют только сами линии разрывов. А поскольку сами разрывы уже известны, никакой новой информации это не дает.

Рассмотренные в статье способы аппроксимации и трансформации гладких и разрывных границ реализованы в виде технологически эффективных программных продуктов GridBuilder и GridMaster для РС под различными версиями ОС Windows. Они функционируют либо как локальные, либо как сетевые программные ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А.М. Геологическое картирование нефтегазовых территорий с помощью ЭВМ. – М.: Недра, 1988. – 222 с.
2. Моделирование геологического строения объектов, осложненных нарушениями с наклонными плоскостями сместителей / В.А. Волков, С.Е. Гребенников, А.П. Лобасов и др. – М.: ВИЭМС, 1985. – Вып. 9. – 7 с.
3. Гусев В.А. Совместная аппроксимация сложных и разрывных геологических поверхностей // Экспресс-информ. / ВИЭМС. Сер. «Математические методы исследований в геологии». – 1983, – Вып. 9. – С. 1–14.
4. Красавчиков В.О. Комплексная интерпретация слабосогласованных геолого-геофизических данных при построении региональных структурных карт (на примере осадочного чехла Западно-Сибирской плиты) // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 5. – С. 456–469.
5. Василенко В.А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. – Новосибирск: Наука, 1983. – 214 с.
6. Белонин М.Д., Жуков И.М. Геометрические свойства поверхностей Александровского поднятия Куйбышевской области // Вопросы математической геологии. – Л.: Наука, 1968. – С. 194–207.