

А.Е. Артемьев, Р.А Федорчук, ОАО "Саратовнефтегеофизика", г. Саратов

Введение

Одно из основных направлений разведки нефти и газа в Саратовском Поволжье связано с тектонически-экранированными структурами нижнего терригенного комплекса осадочного чехла в зоне сопряжения Бузулукской впадины с Жигулевско-Пугачевским сводом, Степновского сложного вала и "кольца" Саратовских дислокаций с обрамляющими землями в "створе" Рязано-Саратовского прогиба. Для этой территории характерно широкое развитие дизъюнктивных нарушений предтиманской и предфаменской тектонических фаз. Все представляющие разведочный интерес структуры имеют антиклинально-блоковое строение и обусловлены сбросами и грабенами предтиманского возраста амплитудой от 40 до 85м. С предфаменской тектонической фазой связано образование региональных разломов амплитудой до 300-350м. В таких сложных геологических условиях, для повышения эффективности интерпретации данных сейсморазведки, возникает необходимость использовать специализированные процедуры обработки и интерпретации, позволяющие более точно определять положение тектонических объектов. При этом наибольшее распространение в практике сейсмической интерпретации получили такие методы, как анализ мгновенных параметров и атрибутов когерентности. В настоящее время существует большое количество сейсмических атрибутов, которые могут оказать помощь геофизику при изучении тектонических нарушений [6,7,8,12].

В данной работе для решения этой задачи авторами сделана попытка использовать атрибуты кривизны поверхности, вычисляемые по структурным картам. Методы, использующие теорию кривизны, давно применяются для решения различных задач в геодезии и гравиразведке [3], а также в других дисциплинах [10]. Примеры использования теории кривизны в сейсмическом методе приведены в работах [2,6-12]. Там же приведены списки соответствующей литературы.

Теория кривизны

Теория кривизны имеет долгую историю, но современный вид она приобрела после того, как в 1827 Гаусс опубликовал свою фундаментальную работу "Общее исследование о кривых поверхностях". Кривизна представляет собой свойство кривой, которое показывает, как кривая в каждой точке отличается от прямой. Для определения понятия кривизны обратимся к рисунку 1. Пусть P произвольная точка кривой, а Q , близкая к P точка кривой. Обозначим $\Delta\theta$ угол между касательными к кривой в точках P и Q , а Δs - длину дуги отрезка PQ . Тогда кривизну кривой в точке P можно определить как предел отношения угла $\Delta\theta$ к длине соответствующей дуги, при стремлении последней к нулю:

$$K = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} \quad (1)$$

На плоскости, где введена декартова прямоугольная система координат, длина элемента дуги ds может быть выражена по теореме Пифагора:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad \text{или} \quad \frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}.$$

Учитывая, что $\theta = \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right)$, можно записать выражение для кривизны (1) в следующем виде:

$$K = \frac{d\theta}{ds} = \frac{d^2y/dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}} \quad (2)$$

Формула (2) позволяет найти выражение для кривизны произвольной кривой, заданной уравнением $y=f(x)$. Величина обратная кривизне носит название радиуса кривизны и связана с понятием соприкасающейся окружности. Соприкасающейся окружностью плоской кривой в точке P называется предельное положение окружности, проходящей через P и две соседние точки кривой Q_1 и Q_2 , при стремлении Q_1 и Q_2 к P , как это показано на рисунке 2.

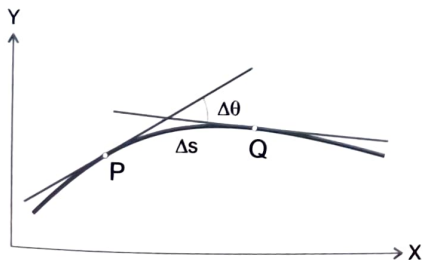


Рис. 1. К определению понятия кривизны

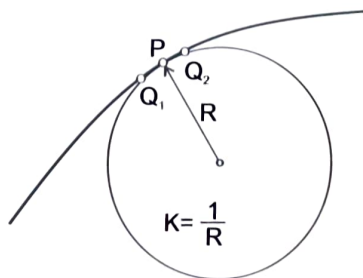


Рис. 2. Соприкасающаяся окружность



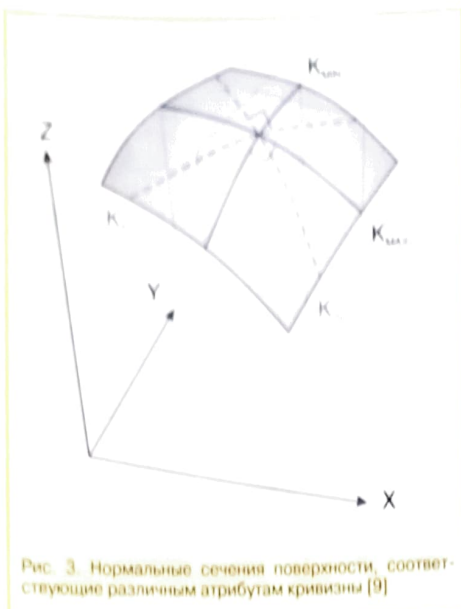


Рис. 3. Нормальные сечения поверхности, соответствующие различным атрибутам кривизны [9]

Двумерная теория кривизны может быть расширена на случай трех измерений. В этом случае, кривая может быть представлена как результат сечения поверхности плоскостью. Пересечение плоскости и поверхности описывает кривую, кривизна которой может быть вычислена в каждой точке. Очевидно, что существует неограниченное число сечений, которые могут быть получены, и, следовательно, неограниченное число кривизн, которые могут быть вычислены. При этом наиболее полезно такое подмножество сечений, которое ортогонально поверхности и называется нормальными кривизнами. Отметим наиболее важные для нас свойства указанного подмножества сечений. Во-первых, средняя из двух любых ортогональных нормальных кривизн в точке поверхности является постоянной и определяется как средняя кривизна:

$$K_{mean} = \frac{K_1 + K_2}{2} = \frac{K_{max} + K_{min}}{2}, \quad (3)$$

где K_1 и K_2 представляют любую пару ортогональных нормальных кривизн. Во-вторых, из неограниченного числа нормальных кривизн, которые проходят через частную точку поверхности, существует единственная кривая, которая определяет наибольшую абсолютную кривизну. Она называется максимальной кривизной K_{max} . Кривая, перпендикулярная к K_{max} , называется минимальной кривизной K_{min} . Эти два атрибута поверхности называются главными кривизнами (рисунок 3).

Любая другая нормальная кривизна K_N может быть найдена из главных кривизн по формуле Эйлера:

$$K_N = K_{max} \cos^2 \delta + K_{min} \sin^2 \delta, \quad (4)$$

где δ - угол между плоскостью частной нормальной кривизны K_N и плоскостью максимальной кривизны K_{max} . Третья важная характеристика поверхности связана с произведением главных кривизн:

$$K_G = K_{max} K_{min}. \quad (5)$$

Этот тип кривизны называется полной или гауссовой кривизной поверхности.

Математические вопросы, связанные с определением выражений для гауссовой кривизны поверхности, рассмотрены авторами в [1]. В работе [2] Для поверхности в декартовых координатах $z = z(x, y)$, эти выражения выглядят следующим образом:

$$K_{mean} = \frac{1}{2} \frac{(1 + q^2)r^2 - 2pqr + (1 + p^2)s^2}{(1 + p^2 + q^2)^{3/2}}, \quad (6)$$

$$K_G = \frac{rs - p^2t - q^2u}{(1 + p^2 + q^2)^2}, \quad (7)$$

где $p = dz/dx, q = dz/dy, r = d^2z/dx^2,$

$$s = d^2z/dx dy, t = d^2z/dx^2,$$

Для заинтересованного читателя также могут быть полезны классические книги по дифференциальной геометрии [4] и [5].

Атрибуты кривизны

Аппарат дифференциальной геометрии изложенный в предыдущем разделе, применим к поверхностям, заданным уравнением вида $z = z(x, y)$.

Поскольку анализируемая поверхность (карта) не является аналитически заданной функцией, необходимо построить некоторую поверхность, наилучшим образом аппроксимирующую исследуемую карту в смысле метода наименьших квадратов. В процессе вычисления кривизны, в каждой конкретной точке формируется локальная поверхность второго порядка, определяемая уравнением

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (8)$$

Коэффициенты этого уравнения могут быть вычислены путем решения системы нормальных уравнений. Разностная схема, использующая девять точек, описана в работе [10]. Также известны схемы, использующие большее число точек и требующие решения большего числа нормальных уравнений. Коэффициентами уравнения (8) определяются все возможные типы атрибутов кривизны поверхности. Различными авторами [6-12] было предложено большое количество атрибутов кривизны, из которых мы выбрали наиболее часто используемые в практике интерпретации данных сейсмоземлетрясений:

- Средняя кривизна (K_{mean});
- Гауссова кривизна (K_G);
- Максимальная и минимальная кривизна (K_{max} и K_{min});
- Наибольшая положительная и наибольшая отрицательная кривизна (K_+ и K_-);
- Кривизна наклона (K_{dip});
- Тангенциальная кривизна (K_s);
- Контурная кривизна (K_c);
- Степень кривизны (C);
- Индекс формы (S);
- Азимут максимальной кривизны (ψ).

Подробное описание и сравнительный анализ различных атрибутов приводится авторами в работе [2]. Например, средняя кривизна, как было показано выше, играет огромную роль в теории поверхностей, но сама по себе она не относится к наиболее полезным атрибутам. Тем не менее, средняя кривизна важна для нас, поскольку используется для вычисления других атрибутов. Некоторые авторы (см., например, работу [9]), использовали гауссову кривизну как инструмент выделения тектонических

нарушений. Но позже было показано [6,7,8,10,11,12], что гауссова кривизна не является лучшим атрибутом для этой цели. Очень интересный пример использования степени кривизны по данным морской сейсморазведки, полученным в Аргентине, дается в работе [11]. В результате экспериментов авторами было установлено, что одним из наиболее эффективных средств картирования дизъюнктивных нарушений является использование наибольшей положительной и наибольшей отрицательной кривизны. Как будет показано ниже, самым эффективным для решения задачи выявления дизъюнктивных нарушений по данным сейсморазведки из всех рассмотренных в данной работе атрибутов оказался атрибут K_{dip} .

Программная реализация

Для вычисления атрибутов кривизны, рассмотренных в предыдущем разделе, авторами было создано автономное приложение для персональных компьютеров под управлением операционной системы Microsoft Windows. Это приложение получило название «СМар». Схематично алгоритм работы программы «СМар» можно изобразить следующим образом:

- чтение исходных данных в формате XYZ;
- применение фильтра к исходным данным;
- вычисление коэффициентов уравнения (8);
- расчет атрибутов кривизны;
- нормировка результатов вычислений;
- запись результатов в файлы формата XYZ.

На вход программы подаются результаты структурной интерпретации сейсмических данных в виде текстовых файлов в формате XYZ, где X и Y – прямоугольные координаты, а Z – параметр. В качестве прямоугольных координат могут быть использованы реальные топографические координаты, либо номера X,Y линий 3D съемки. В качестве параметра могут

быть приняты значения глубин или же времени T_0 сейсмических горизонтов.

Программа дает возможность производить по желанию пользователя одновременный расчет всех атрибутов кривизны, либо только необходимых в данный момент для работы пользователя. Применение фильтра и нормировки также оставляется на усмотрение пользователя. Запись вычисленных атрибутов производится в директорию указанную пользователем в виде текстовых файлов в формате XYZ.

Результаты

При изучении любого нового геофизического метода, опробовании нового алгоритма или программы необходимо выполнить их тестирование на модельных либо эталонных данных, учитывающих всю существенную для решения геологической задачи информацию и, вместе с тем, достаточно простых по строению. Только после получения удовлетворительных результатов по эталонным данным, можно переходить к работе с более сложными реальными данными. В качестве таких эталонных данных была использована структурная карта, интерпретированная с учетом тектонических нарушений. Результаты расчета атрибутов по этим данным с использованием программы «СМар» приведены на рисунке 4. В верхней части этого рисунка кроме исходной карты приведен временной разрез, на котором показаны разрывные нарушения, связанные с предтиманской фазой тектогенеза. В нижней части рисунка показаны карты двух из наиболее информативных атрибутов кривизны. Многие исследователи приводят в своих работах атрибуты наибольшей положительной и отрицательной кривизны как наиболее информативные. Наш опыт работы с атрибутами кривизны показал, что наиболее интересным в связи с задачами выявления и картирования дизъюнктивных нарушений являются такие атрибуты как K_{dip} , K_+ , K_- . На карте атрибута K_+ (рисунок 4В) мы можем видеть хорошее совпадение изолиний кривизны с линиями тектонических нарушений, проведенных интерпретатором по исходной карте. Еще лучший результат удалось получить при использовании карты атрибута K_{dip} . Изолинии K_{dip} почти в точности повторяют заданные в исходных данных линии тектонических нарушений. Точное положение сечения поверхности отражающего горизонта плоскостью сбрасывателя может быть определено по смене знака значений кривизны, то есть по переходу с красного на синий цвет (рисунок 4Г).

Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению результатов расчета атрибутов по неинтерпретированным данным, необходимо кратко остановиться на вопросах, связанных с подготовкой исходной карты. Из формул (6) и (7) следует, что кривизна тесно связана со вторыми производными поверхности. Известно, что процедура дифференцирования очень чувствительна к шумам, которые могут присутствовать на исходной карте. По этой причине необходимо использовать различ-

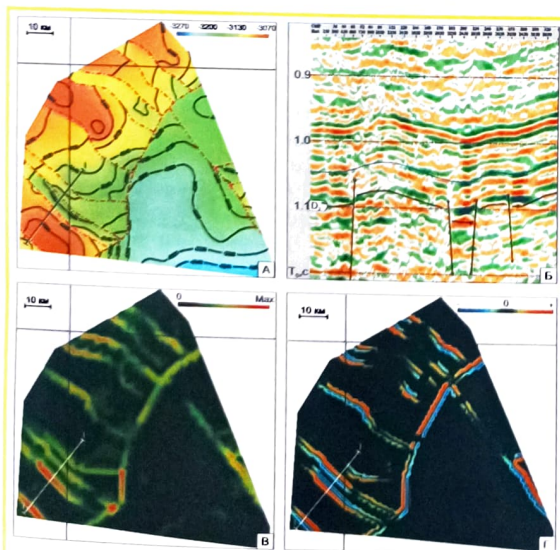
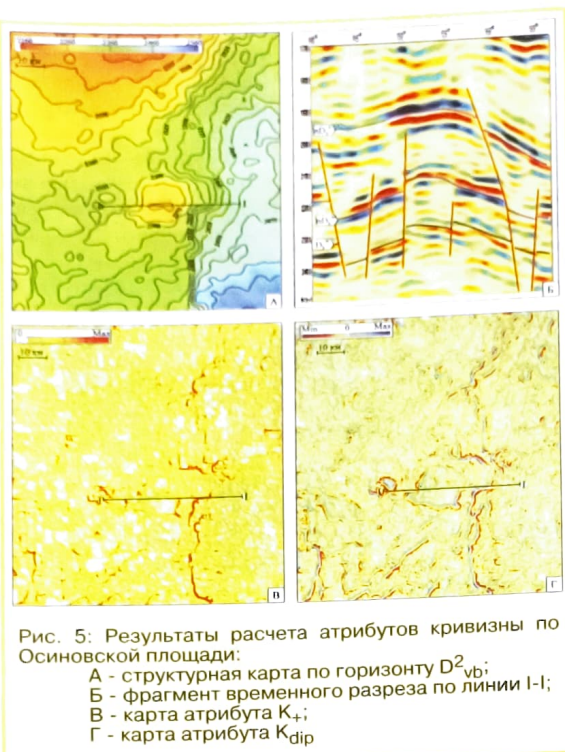
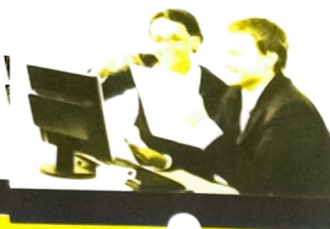


Рис. 4. Результаты расчета атрибутов кривизны по эталонным данным:

- А - структурная карта по горизонту $D2_{vb}$;
- Б - фрагмент временного разреза по линии I-I;
- В - карта атрибута K_+ ;
- Г - карта атрибута K_{dip}



ные типы двумерных фильтров, например, итеративный медианный фильтр или фильтрация методом взвешенного среднего. При этом следует использовать очень мягкие параметры, поскольку в противном случае можно понизить разрешенность данных и исказить положения разломов на картах атрибутов. В работе [8] автор рекомендует использовать итеративный медианный фильтр с размером базы, то есть не больше апертуры расчета коэффициентов уравнения (8). Фильтрация данных может быть выполнена в пакетах карт-построения, либо непосредственно в программе «СМар». С этой целью в программу включена выбираемая по желанию пользователя опция фильтрации, с возможностью задания базы фильтра.

Для опробования программы «СМар» было выбрано Осиновское месторождение, расположенное в пределах Степновского мегавала входящего в состав Рязано-Саратовского прогиба. В 2000 году силами ОАО «Саратовнефтегеофизика» на Осиновском месторождении были проведены полевые сейсморазведочные работы методикой ОГТ-3D и выполнена обработка в комплексе Geovector Plus (разработка CGG). Геологической задачей работ являлось детальное изучение строения ловушки Осиновского месторождения, картирование блоков, ограниченных разрывными нарушениями различной амплитуды. В 2001 году была выполнена миграция до суммирования в программном комплексе GeoDepth (разработка Paradigm Geophysical) [1]. Фрагмент глубинно-динамического разреза через Осиновскую структуру приведен на рисунке 5Б. Последним горизонтом, участвующим в построении глубинно-скоростной модели для пластовой миграции являлось отраже-

ние от подошвы саргаевских отложений ($D3sr$). Этот горизонт был подвержен тектоническим нарушениям в предфаменскую фазу. Тектонические нарушения предфаменского возраста характеризуются предельными амплитудами и достаточно надежно трассируются даже по немигрированным данным. Наибольший интерес с точки зрения уточнения знания о геологическом строении ловушки Осиновского месторождения представляло изучение дизъюнктивных нарушений предиманской фазы. С этой целью авторами и были использованы атрибуты, рассчитанные по программе «СМар». В процессе подготовки исходных данных были выполнены следующие операции:

- ручная корреляция каждой двадцатой X и Y линий горизонта $D2_{vb}$;
- автоматическая корреляция указанного горизонта;
- фильтрация полученной карты в программе «СМар» на базе 3x3 трассы.

Полученная в результате этих действий карта приведена на рисунке 5А. В центральной части карты хорошо просматривается положение Осиновского поднятия. Для быстрого и эффективного определения местоположения разрывных нарушений, ограничивающих структуру, был произведен расчет атрибутов кривизны. На рисунке 5 показаны карты двух из них - K_{dip} и K_{dip} . Важным аспектом является представление результатов. Здесь необходимо выбрать оптимальный метод построения карты и тщательно подобрать цветовую палитру. Метод взвешенных сумм, первоначально использовавшийся авторами для

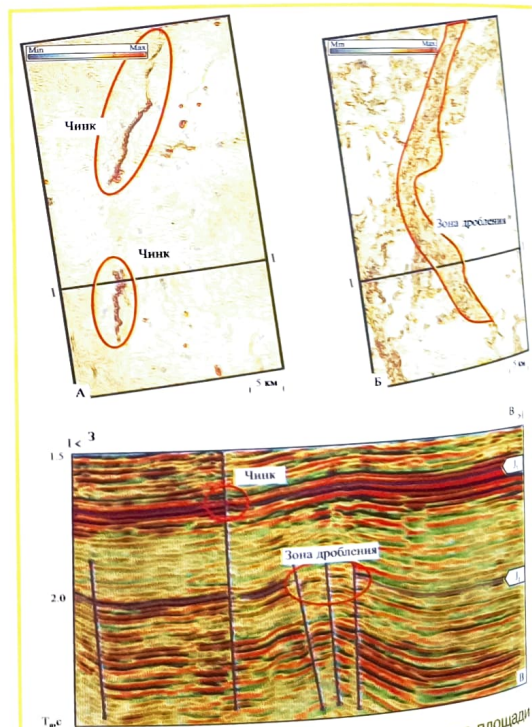


Рис. 6. Результаты расчета атрибута K_{dip} по площади Угра:
 А - карта атрибута K_{dip} по горизонту J_3 ;
 Б - карта атрибута K_{dip} по горизонту J_2 ;
 В - фрагмент временного разреза по линии I-I

построения карт атрибутов, оказался неподходящим для этой цели. Значительно лучшие результаты удалось получить с использованием алгоритмов крайинга. Что касается выбора палитры цветов, то здесь приходится использовать индивидуальную палитру для всех атрибутов на каждой исследуемой площади. Иногда, для лучшего отображения полученных результатов, целесообразно использовать процедуру нормировки, реализованную в программе «СМар». Как видно из рисунка, на карте атрибута K_{dip} отчетливо проявляется высокоамплитудное разрывное нарушение предфаменского возраста. Его положение с большой степенью точности совпадает с принятой моделью используемой для проведения миграции. Гораздо больший интерес для нас представляли нарушения предтиманского возраста.

Анализ полученных карт атрибутов показал, что для изучения этих объектов наиболее целесообразным является использование карты атрибута K_{dip} . По результатам интерпретации полученных данных удалось уточнить положение разрывных нарушений контролирующего резервуар Осиновского месторождения.

В качестве еще одного примера использования атрибутов кривизны для решения задач структурной интерпретации авторами было выбрано месторождение Урга расположенное в Муйнакском районе Республики Узбекистан. В 2007 году силами ОАО «Саратовнефтегеофизика» на месторождении Урга были выполнены полевые сейсморазведочные работы методикой ОГТ-3D по площади 450 км². Данная площадь, в тектоническом отношении, приурочена к западной части Судочьего прогиба и восточному склону Куаныш-Коскалинского вала. На исследуемой площади отмечается наличие нескольких разновозрастных систем нарушений, соответствующих различным тектоническим фазам и секущих, как фундамент, так и низы осадочного чехла. Имеются и сквозные нарушения, затрагивающие весь разрез осадочного чехла. В частности, в пределах 3D-съемки прослеживается четкое дизъюнктивное нарушение, имеющее наибольшую интенсивность по нижнеюрским горизонтам. Вверх по разрезу амплитуда нарушения несколько уменьшается. По поверхности данное нарушение коррелируется с зоной крутого склона (чинка) разделяющего плато Устюрт и равнинную территорию долины реки Амударья, а также прибрежной зоны Аральского моря.

Фрагмент временного разреза по линии I-I 3D-съемки Урга показан в нижней части рисунка 6. В верхней части разреза отчетливо прослеживается отражающий горизонт J_3 , связанный с кровлей юрского комплекса (кровлей кимеридж-титона). Этот горизонт характеризуется наличием высокоамплитудного дизъюнктивного нарушения, обозначенного на рисунке как «чинк». По нижележающим горизонтам наблюдается множество разрывных нарушений, в том числе зона тектонического дробления.

Исходя из опыта предыдущих работ,

связанных с анализом атрибутов кривизны, для изучения систем разрывных нарушений авторами был выбран атрибут K_{dip} . На рисунке 6 приведены карты атрибута K_{dip} по горизонтам J_3 и J_2 . Изолиниями показаны линии равных времен, измеряемые в секундах. На рисунке 6 (А) отчетливо выделяется зона «чинка». На рисунке 6 (Б) хорошо проявляется разновозрастные системы нарушений, затрагивающие горизонт J_2 .

Выводы

Применение разработанной авторами программы «СМар» дает возможность оперативно производить расчет двенадцати атрибутов, связанных с кривизной поверхности. Использование карт атрибутов кривизны позволяет существенно ускорить процесс интерпретации данных 3D сейсморазведки в условиях развития дизъюнктивной тектоники.

Литература

1. Артемьев А.Е., Гавриков А.Г., Федорчук Р.А., 2003, К вопросу о необходимости применения 3D миграции до суммирования в платформенных условиях: Приборы и системы разведочной геофизики, 4, 40-44.
2. Артемьев А.Е., Федорчук Р.А., 2006, Атрибуты кривизны и их использование для картирования дизъюнктивных нарушений: Геофизика, 5, 16-21.
3. Гравиразведка: Справочник геофизика, 1990, под ред. Мудрецов Е.А., Веселова К.Е.: М., Недра.
4. Погорелов А.В., 1974, Дифференциальная геометрия: М., Наука.
5. Рашевский П.К., 1956, Дифференциальная геометрия: М., Физматгиз.
6. Chopra S., Marfurt K., 2005, Seismic attributes – A historical perspective: Geophysics, 70, 3S0-28S0.
7. Chopra S., Marfurt K., 2006, Seismic attributes mapping of structure and stratigraphy: SEG/EAGE Distinguished Instructor Short Course.
8. Klein P., Richard L., James H. 3D curvature attributes: a new approach for seismic interpretation, First Break, 26, 2008, 105-111.
9. Lisle, R. J., 1994, Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis AAPG Bulletin, 78, 1811-1819.
10. Roberts A., 2001, Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons: First Break, 19, 85-100.
11. Sigismondi E.M., Soldo J.C., 2003, Curvature attributes and seismic interpretation: Case studies from Argentina basins: The Leading Edge, 22, 1122-1126.
12. Tingdahl K.M., de Rooij M., 2005, Semi-automatic detection of faults in 3D seismic data: Geophysical Prospecting, 53, 533-542.



ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТОНКОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ