

УДК 55

DOI 10.21661/r-557897

Асосков А.Е., Сенчина Н.П.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ПРИСУТСТВИИ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ (НА ПРИМЕРЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ)

Аннотация: в статье рассматриваются примеры применения различных трансформаций, используемых в интерпретации потенциальных полей, к синтетической модели поля, источники которого осложнены сдвиговыми деформациями. Автор отмечает, что в первую очередь, синтезирована модель геофизического поля, далее смоделирован ожидаемый отклик от модели в потенциальном поле (гравитационном), затем выполнен расчет ряда трансформаций и проведен их анализ. Показано, что трансформации недостаточно однозначно выделяют зоны сдвиговых нарушений.

Ключевые слова: сдвиг, геофизика, методы потенциальных полей, разлом, геотектоника.

Интерпретация данных потенциальных полей – грави- и магниторазведки – один из методов решения геотектонических задач, связанных с выделением разрывных нарушений. Разломы – области нарушение сплошности горных пород со смещением пород по поверхности разрыва – представляют значительный интерес для геологоразведки как зоны рудоотложения, контроля рудообразования (движения рудоносных флюидов), смещения рудных тел [3; 4].

Одним из наиболее интересных типов разрывных нарушений являются сдвиги – смещения одних блоков горных пород относительно других преимущественно в горизонтальном направлении по субвертикальному разлому. Не смотря на простоту описания, сдвиги сложно идентифицируются в потенциальных полях, по сравнению со сбросами, взбросами и другими типами простых нарушений [5; 6]. Так, при мелкомасштабных работах сдвиги проявляются как резкие смещения осей простирации аномалий. При крупномасштабных работах

в зоне сдвига могут проявляться цепочки аномалий разного знака – как проявления структур типа «пул-апарт», «поп-ап», сколов Риделя, трещин растяжения или складок. В текущей работе рассмотрено проявление сдвигов в мелком масштабе – как зон смещения осей аномалий без моделирования вещественных изменений в зоне влияния сдвига.

Изучим, какие трансформации (математические преобразования потенциальных полей) приводят к наилучшему выделению зон сдвигов и каковы основные проблемы в таком методе решения задачи трассирования разломов. Для оценки эффективности применяемых трансформаций синтезируем модельное поле, где разместим систему сдвигов. Сформируем модель поля, имитируя эволюцию геологического строения территории (рис. 1 а – д).

А. Рассмотрим область наличия меридиональной границы горных пород различных свойств (на рис. 1 а – штриховая линия); вкrest границе заложим левосторонний сдвиг (сплошная линия).

Б. Сдвиг развился – произошло смещение блоков горных пород в горизонтальном направлении (рис. 1 б).

В. На территории, испытавшей воздействие сдвига, заложилась система субпараллельных даек (рис. 1 в).

Г. Через сформированную систему заложено два сдвига (рис. 1 г).

Д. Сдвиги развились со значимым смещением в осях даек (рис. 1 д) – получена итоговая схема строения территории.

Е. Смоделируем на качественном уровне (в условных единицах – у.е.) ожидаемое аномальное поле от полученной системы геологических тел (рис. 1 е).

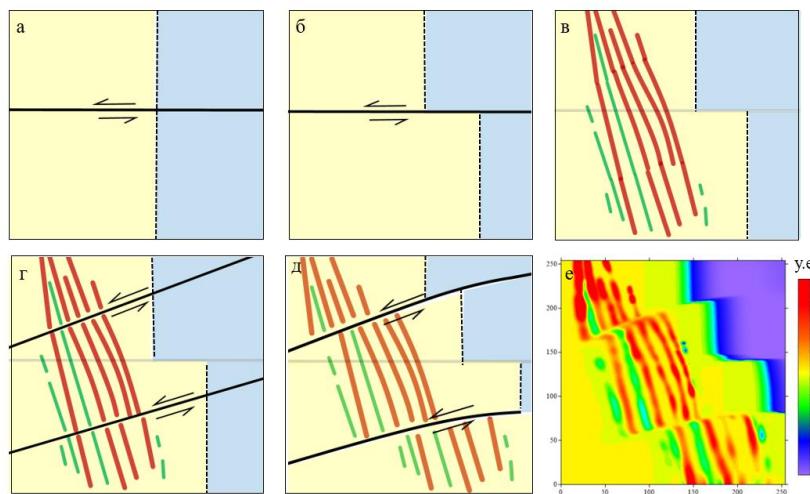


Рис. 1. Этапы развития синтетической модели – имитация формирования разрывных нарушений: а – заложение сдвига вкрест простирания границы геологических структур, б – развитие сдвига, в – заложение системы субпараллельных даек, г – заложение секущих дайки сдвигов, д – развитие секущих дайки сдвигов, е – модельное поле, имитирующее отклик в гравитационном поле от геологических разностей отличающейся плотности

Полученную цифровую модель, отображенную на рисунке 1, е и на рисунке 2, можно использовать в качестве «идеальной» модели сдвигового нарушения, не осложненного помехами и нецелевыми объектами, для тестирования алгоритмов трассирования разрывных нарушений.

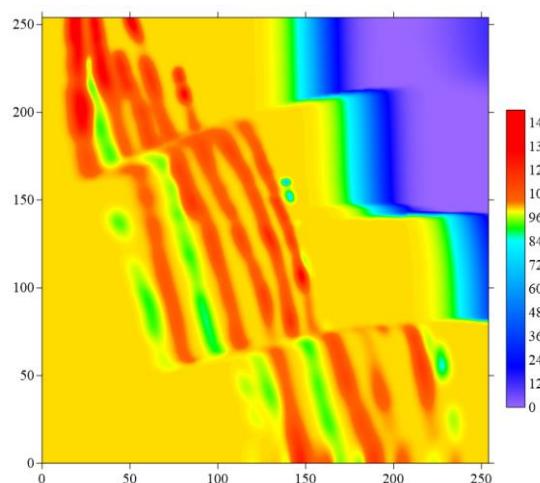


Рис. 2. Синтетическое поле для опробования способов трассирования разрывных нарушений (цветовая шкала в усл. ед. поля, оси х и у на карте – в условных единицах расстояния)

Реальные поля представляют собой сумму аномалий от многочисленных геологических объектов: рудных тел, контактов горных пород, тектонических нарушений, антиклинальных и синклинальных структур и т. п. При решении конкретных геологических задач из этого суммарного поля необходимо выделить только аномалии, создающиеся интересующими исследователя объектами. Для этого исходное поле преобразуют (трансформируют) так, чтобы усилить интересующие нас особенности поля и ослабить другие. Рассмотрим некоторые трансформации полученного поля, обозначим поле как F (рис. 1, е) – для математических преобразований это поле будет исходным.

Расчет модуля горизонтального градиента поля позволяет выделять области концентрации изолиний исходного поля, связанные с границами блоков пород разных свойств или с тектоническими нарушениями. Оператор (*Hor_grad*) выражается в случае непрерывных функций для поля F следующим образом:

$$Hor_grad F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}$$

– вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов частных производных по направлениям X и Y.

При работе с дискретно заданными полями («гридами») используется следующая формула расчета модуля горизонтального градиента:

$$Hor_grad F = \sqrt{\left(\frac{F_E - F_W}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{F_N - F_S}{2\Delta y}\right)^2}.$$

В приведенном выражении используется метод центральной разности, в котором для расчета требуются значения по разные стороны от точки расчета (F на рис. 3). Соответственно, точка, расположенная южнее, обозначена с индексом S, восточнее – с индексом E и т. д. Δx и Δy обозначают шаг сетки грида по направлениям X и Y, то есть под квадратами в последнем выражении указаны нормированные на шаг сетки приращения поля с расстоянием – то есть, дискретные выражения направленных производных поля.

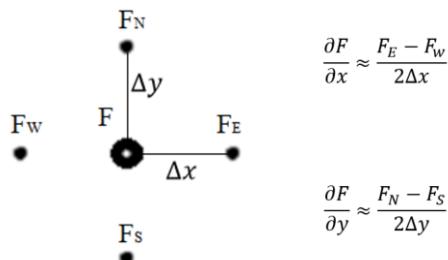


Рис. 3. К расчету модуля горизонтального градиента при дискретном задании поля

В распространенном программном обеспечении Surfer используется вызов указанной трансформанты по пути: Grid – Calculus – Differential & Integral operations – Gradient operator.

Полученная в результате карта (рис. 4), как видно, подчеркивает локальную составляющую поля, а также выделяет границы – зоны резкого изменения поля – как зоны максимума расчетного параметра. Как видно, зоны сдвига проявляются в области развития даек (рис. 4, справа – 1, 2) так же, как зоны смещения осей аномалий, однако в зоне нарушений первичной границы пород различной плотности, сдвиг проявляется как резкоградиентная зона – с максимумом поля (рис. 4, справа – 3, 4, 5).

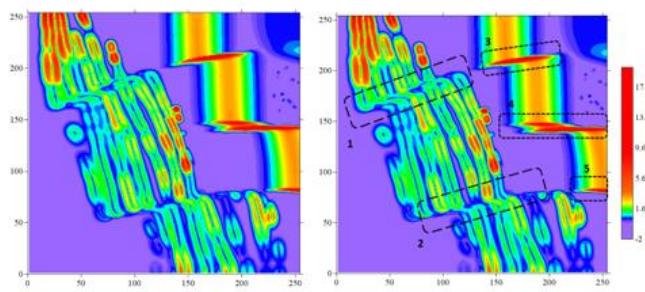


Рис. 4. Результат расчета трансформации «модуль горизонтального градиента» для модельного поля (цветовая шкала в усл. ед.) в свободном виде (слева) и с элементами интерпретации (справа)

Следующим применим алгоритм автоматической трассировки линеаментов авторства М.Б. Штокаленко, реализованный в виде макроса в библиотеке макросов «ТомПоПо» [1; 2; 8]. Под линеаментом понимается линия резкого изменения

параметров геологической структуры, географической среды и геофизических полей, чему соответствует в числе прочих, и зона сдвига. Макрос картирует линеаменты по файлу в формате с расширением «*.grd» («грид») в горизонтальной или в вертикальной плоскости методом Tilt – средствами программы Surfer рассчитываются производные по направлениям двух координатных осей, берётся арктангенс от отношения частных производных, вычисляется модуль градиента полученного угла. Это повторяется 2 раза – для отношения вертикальной производной к горизонтальной и для отношения горизонтальной производной к вертикальной. Результаты перемножаются, вычисляется среднее геометрическое. В итоге линеаменты выявляются как зоны изменения направления градиента поля и соответствуют осям локальных линейных аномалий в зонах даек, и зонам сдвига в области контакта пород (рис. 5, справа, 3, 4, 5). В зоне сдвиговой деформации даек система линеаментов направлена по направлению смещения – по косой линии (рис. 5, справа, 1, 2).

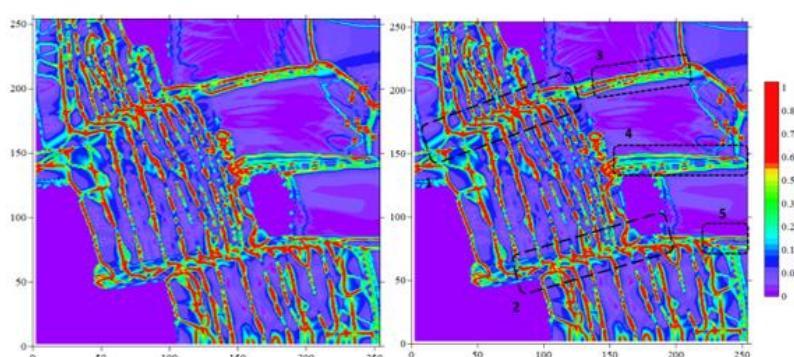


Рис. 5. Результат расчета трансформации «линеамент» по алгоритму М.Б. Штокаленко для модельного поля в свободном виде (слева) и с элементами интерпретации (справа). Цветовая шкала – в условных единицах (1 – наличие линеамента, 0 – отсутствие линеамента)

Следующим рассмотрим процесс «скелетирования» аномального поля – выделения линий вдоль основных аномалий поля и градиента поля. Используем для решения такой задачи макрос «Reana» автора М.Б. Штокаленко («Реана», РЕЛЬ-ефа АНАлиз) – макрос трассирует оси положительных аномалий (водоразделы)

по полю – рельефу, заданному матрицей значений в узлах регулярной сети. Аналогичный смысл имеет применение макроса к данным потенциальных полей – грубее говоря, это линии, соединяющие положительные аномалии. Результаты записываются в файл с расширением «*.dfx», где сохраняются линии водоразделов. Можно задать параметр «Минимальный уровень поля», тогда будут выведены только фрагменты осей аномалий на участках, где поле превышает уровень, указанныйенным параметром. В авторском изложении, из каждого узла регулярной сети с определенным значением поля пускается «ручеек» до самого дна впадины, в которую этот ручеек стекает, или до выхода за границу матрицы данных. Впадение новых ручеек в ранее проведенные определяет водосборные бассейны, границы которых и являются искомыми водоразделами, т. е. осями положительных аномалий. Для трассирования осей отрицательных аномалий – тальвегов значения поля умножаются на –1.

В данном случае алгоритм применен к исходному полю (выделены жирные темно-синие линии на рисунке 6) и к модулю горизонтального градиента поля (тонкие темно-синие линии на рисунке 6). Как видно на карте результатов с элементами интерпретации (рис. 6, справа), зоны сдвигов в области даек видны как зоны потери корреляции осей аномалий (1, 2). Зоны сдвигов в области контакта пород видны как линии осей аномалий градиента поля.

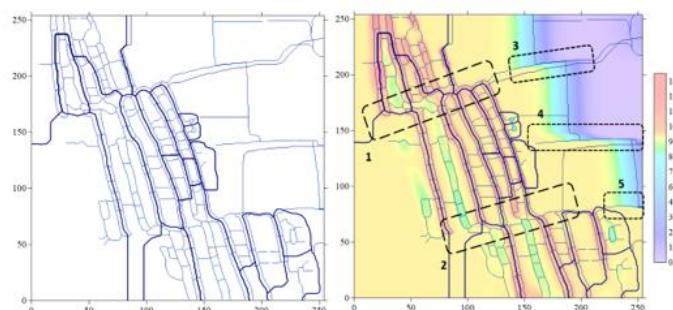


Рис. 6. Результат расчета линий осей аномалий по алгоритму М.Б. Штокаленко «Reana» для модельного поля и модуля горизонтального градиента поля в свободном виде (слева) и с элементами интерпретации на подложке в виде исходного поля (справа)

Рассмотренные примеры показали, что трансформации, эффективно применяемые для картирования разрывных нарушений – расчет модуля горизонтального градиента, автоматическое трассирование линеаментов, картирование осей аномалий путем «скелетирования» поля – выделяют зоны сдвигов наряду с другими особенностями поля. Однако, такие зоны в зависимости от окружающей обстановки видны по-разному, тогда как схожим образом проявляются и другие особенности поля. То есть, рассмотренные трансформанты не могут выявлять однозначно зоны сдвиговых нарушений, но дают дополнительную информацию для экспертной интерпретации геофизических данных. Остается открытым вопрос предложения трансформации, ориентированной именно на выделение сдвигов, как целевых структур, проявляющихся в потенциальных полях.

Список литературы

1. Алексеев С.Г. Достоинства и недостатки томографии потенциальных полей / С.Г. Алексеев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: мат. 43-й сессии Междунар. науч. сем. им. Д.Г. Успенского. – 2016. – С. 10–13.
2. Алексеев С.Г. Обоснование адекватности томографии потенциальных полей / С.Г. Алексеев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: мат. 44-й сессии Междунар. сем. им. Д.Г. Успенского. – 2017. – С. 23–28.
3. Хасанов И.М. Особенности глубинного строения Аган-Утесинского рудного узла по геофизическим данным / И.М. Хасанов // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. – 2017. – №1. – С. 32–43.
4. Керимов И.А. Разломная тектоника Терско-Каспийского прогиба и ее проявление в аномальных геофизических полях / И.А. Керимов // Проблемы региональной экологии. – 2013. – №6. – С. 21–25.
5. Сенчина Н.П. Деконволюция Эйлера в интерпретации данных потенциальных полей Казанско-Кажимского авлакогена / Н.П. Сенчина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – №11–2 (113). – С. 7–13.

6. Чернов А.А. Применение потенциальных геофизических методов для выявления и картирования дизъюнктивных дислокаций / А.А. Чернов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2010. – №5. – С. 2–14.
7. Чехович В.Д. Сдвиговая система в земной коре Берингова моря – реликт границы Евразийской и Североамериканской литосферных плит / В.Д. Чехович, О.Г. Шеремет, М.В. Кононов // Геотектоника. – 2014. – №4. – С. 3.
8. Штокаленко М.Б., Алексеев С.Г., Вешев С.А. [и др.] Способ изучения пространственного распределения источников геофизических и геохимических полей // Патент России №2346299 С2, 10.02.2009. Заявка №2007108271/28 от 05.03.2007.

Асосков Артем Евгеньевич – аспирант, геофизик ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», Россия, Санкт-Петербург.

Сенчина Наталья Петровна – канд. геол.-минерал. наук, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Россия, Санкт-Петербург.
