

ТРАНСФОРМАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ПО НАКЛОННОМУ СЛОЮ В СИСТЕМЕ ВЕКТОР

Г.В. Простолупов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: При содержательной интерпретации гравитационного поля в системе «Вектор» предусмотрено послойное «сканирование» изучаемого геологического массива, при этом карты на выходе обработки относятся к виртуальному слою, верхняя и нижняя границы которого линейны и горизонтальны. На деле изучаемая породная толща имеет сложное залегание, часто наклонное, что осложняет сопоставление трансформант и геологических материалов. Предложено использовать в качестве кровли и подошвы разностного слоя структурные карты, полученные по данным бурения и сейсморазведки. Сканирование производится с переменным размером окна, зависящим от глубины залегания геологической поверхности. Таким образом, природные границы раздела сред (поверхности) совпадают с математическими поверхностями разностных карт, что облегчает процесс содержательной интерпретации и сокращает количество трансформант.

Ключевые слова: гравиметрия, трансформация, интерпретация, система «Вектор», геологическое строение, водозащитная толща, аномалия силы тяжести.

Введение

Система «Вектор» в лаборатории геопотенциальных полей получила свое начало в 1990-х годах под руководством В.М. Новоселицкого. Технология служит для исследования плотностного строения недр [1]. В настоящее время система «Вектор» – главный инструмент по изучению объемного плотностного строения недр, на основании которого создаются тектонические схемы, восстанавливается история развития территорий, делается прогноз зон нефтегазонакопления и разуплотненных участков месторождений солей [2].

Как правило, изучаемый геологический разрез имеет разнообразное строение, при этом часто имеет наклонное залегание толщ. Редко слои залегают сугубо горизонтально, хотя программный аппарат метода в силу математической необходимости упрощения предполагает деление поля путем сканирования именно по горизонтальным слоям. Непараллельность слоев трансформированного гравитационного поля и геологических толщ создает проблему для интерпретации разностных карт и 3D диаграмм при наклонном залегании изучаемых слоистых пород, что выражается в значительном числе трансформант и необходимости выделения полезной информации о плотностном строении путем сложных геометрических построений.

Теоретические основы системы «Вектор»

Для понимания важности трансформации поля именно по наклонному слою необходимо обратиться к теоретическим основам системы «Вектор». Технология проведения векторной обработки потенциального поля состоит в покрытии территории съемки на карте сетью треугольников, вершинами которых являются точки наблюдения. В каждом треугольнике по трем приращениям поля определяется полный вектор горизонтального градиента аномалии силы тяжести $G_{набл}$, который относится к центру треугольника. Горизонтальные векторы, основание которых принадлежит точке пересечения медиан треугольника, являются первичным и основным материалом для дальнейших трансформаций поля в системе векторных преобразований. Треугольники многократно взаимно перекрываются. Каждый вектор является функцией как минимум трех измеренных значений поля силы тяжести, а в случае избыточной сети треугольников опирается на еще большее число измеренных значений. Полученные массивы компо-

нент векторов градиента $\{V_{zx}, V_{zy}\}$ подвергаются процедуре сканирования в скользящих окнах различных размеров, в результате чего поле подразделяется на локальную и фоновую составляющие. Определяются также разностные составляющие по паре окон различных размеров. Например, для V_{zx} :

$$V_{zx}^{лок} = V_{zx} - V_{zx}^{фон}, \quad V_{zx}^{фон} = \frac{1}{n} \sum_{\Omega} V_{zx}$$

$$V_{zx}^{разн}(k_1, k_2) = V_{zx}^{лок}(k_2) - V_{zx}^{лок}(k_1) = V_{zx}^{фон}(k_1) - V_{zx}^{фон}(k_2), \quad \text{при } (k_1 < k_2), \quad (1)$$

где k – коэффициент трансформации, являющийся коэффициентом пропорциональности между размером окна осреднения и размером \sqrt{S} изучаемой площади S , Ω – объединяющая n векторов квадратная область (минимальный размер окна должен быть не меньше расстояния между профилями). Значения k изменяются от 0 до 1.

Следующий шаг – интегрирование (восстановление) массива трансформированных значений V_z , т.е. локальных и разностных составляющих при различных окнах осреднения. Это делается для картопостроения и визуализации поля в виде трехмерной диаграммы в аномалиях потенциального поля с целью удобства содержательной интерпретации трансформант.

С увеличением размеров сканирующего окна происходит увеличение глубины «зондирования», то есть увеличивается эффективная мощность изучаемого горизонтального слоя. Это позволяет считать, что локальная составляющая поля отражает строение верхней части разреза – от земной поверхности до некоторой эффективной глубины $h_{эф(i)}$, определяемой коэффициентом трансформации k_i . При увеличении коэффициента трансформации k_{i+1} , эффективная глубина (глубина «зондирования») также увеличится и станет равной $h_{эф(i+1)}$. Тогда разность двух трансформант, или разностную составляющую поля градиентов, определяемую формулой (1), можно считать отражением строения горизонтальной «пачки пород» на глубине от $h_{эф(i)}$ до $h_{эф(i+1)}$. Под «пачкой пород» понимается квазигоризонтальный слой, заключающий в себе совокупность источников поля, например, точечных. В результате получаем разностную карту восстановленного поля, определяемую двумя коэффициентами трансформации и двумя соответствующими эффективными глубинами [3].

Существуют и другие методы томографической интерпретации с изменением характера окна, например алгоритма двумерной фильтрации в скользящих окнах «живой» формы, с помощью которого путем изменения формы окна добиваются разделения поля на составляющие – трендовую и локальную и трассирования осей локальных аномалий. Двумерный фильтр в скользящих окнах «живой» формы построен по результатам анализа двумерной корреляционной функции и спектра поля наблюдения. Форма и размер окна фильтра регулируются с изменением свойств спектральной корреляции поля в зоне фильтрации, поэтому результаты фильтрации оптимизируются в соответствии с аномальной формой и без потери полезной информации во время фильтрации. Алгоритм двумерной фильтрации в скользящих окнах разделяет гравитационную аномалию на 3 компонента: трендовая компонента гравитационного поля, локальная компонента 1-го порядка гравитационного поля, локальная компонента 2-го порядка гравитационного поля [4].

Технология трансформации поля

Как было описано выше, в системе «Вектор» трансформация происходит по плоскопараллельным горизонтальным слоям. В этом случае при наклонном залегании

геологических слоев плоскопараллельные слои секут изучаемую толщу, затрудняя интерпретацию. К примеру, рассмотрим изучение гравитационного поля, измеренного на одном из рудников месторождения калийных солей. Необходимо исследовать плотностное строение наклонного слоя, являющегося водозащитной толщей (ВЗТ) рудника (рис. 1).

Для детальной интерпретации такого наклонного слоя по классической схеме необходимо взять изображение четырех плоскопараллельных горизонтальных разностных карт. Далее выделить на них криволинейные линии пересечения кровли (подошвы) слоя с кровлей (подошвой) разностного слоя, что является сложной задачей и требует кропотливого труда. На каждой карте лишь ее фрагмент в виде полоски отражает плотностное строение наклонной толщи. При этом появляется проблема сложной геометрии в разрезе (ромбовидности), полученного на разностной карте изучаемого слоя (см рис. 1).

Таким образом возникла необходимость трансформации поля непосредственно по наклонному слою. В случае изучения наклонного разреза предложено сканирование поля окнами переменной величины. Величина окна связана с глубиной изучаемого горизонта формулой

$$h = \sqrt{S} \frac{(k_i + k_{i+1})}{2K}$$

где k_i, k_{i+1} – коэффициенты трансформации разностной карты, K – глубинный коэффициент, зависящий от параметров аномалиеобразующих источников; S – величина площади участка.

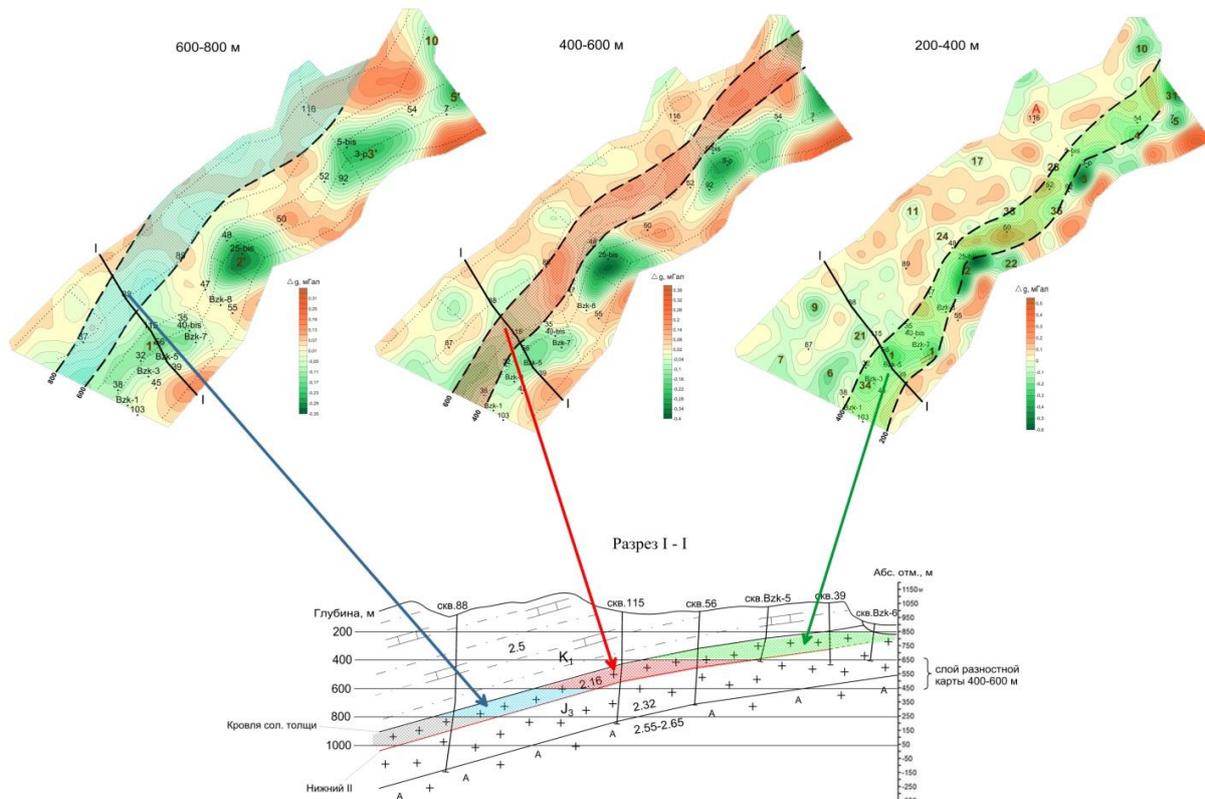


Рис. 1. Разностные трансформанты гравитационного поля, отражающие плотностное строение наклонного слоя водозащитной толщи, схема соответствия вытянутых фрагментов карт участкам изучаемой толщи на разрезе I – I

Если ввести переменный размер окна сканирования таким образом, чтобы размер окна в каждой точке соответствовал глубине кровли слоя или подошвы слоя, на выходе можно получить разностную карту, локальные аномалии которой будут соответствовать гравитационному влиянию аномальных источников, находящихся внутри наклонной толщи, на поверхность наблюдений, соответствующую наклонному слою. В качестве кровли слоя в нашем примере выбрана поверхность соли, в качестве подошвы – продуктивный калийный пласт, слой между двумя приведенными поверхностями является ВЗТ рудника (рис. 2).

Таким образом в обработку вводится два «грида» с криволинейными поверхностями кровли и подошвы слоя, совпадающие с размерностью «грида» исходного гравитационного поля. Каждой точке «грида» соответствует окно сканирования, зависящее от глубины кровли или подошвы этой точки.

Структура аномального гравитационного поля в случае слоистой среды обусловлена двумя основными влияниями: 1 – морфологией поверхностей кровли и подошвы слоя (структурный) и 2 – латеральной плотностной неоднородностью внутри слоя (плотностной). Именно второй фактор – информация о плотностной неоднородности внутри слоя – представляет ценность для прогнозирования потенциально-опасных участков рудника.

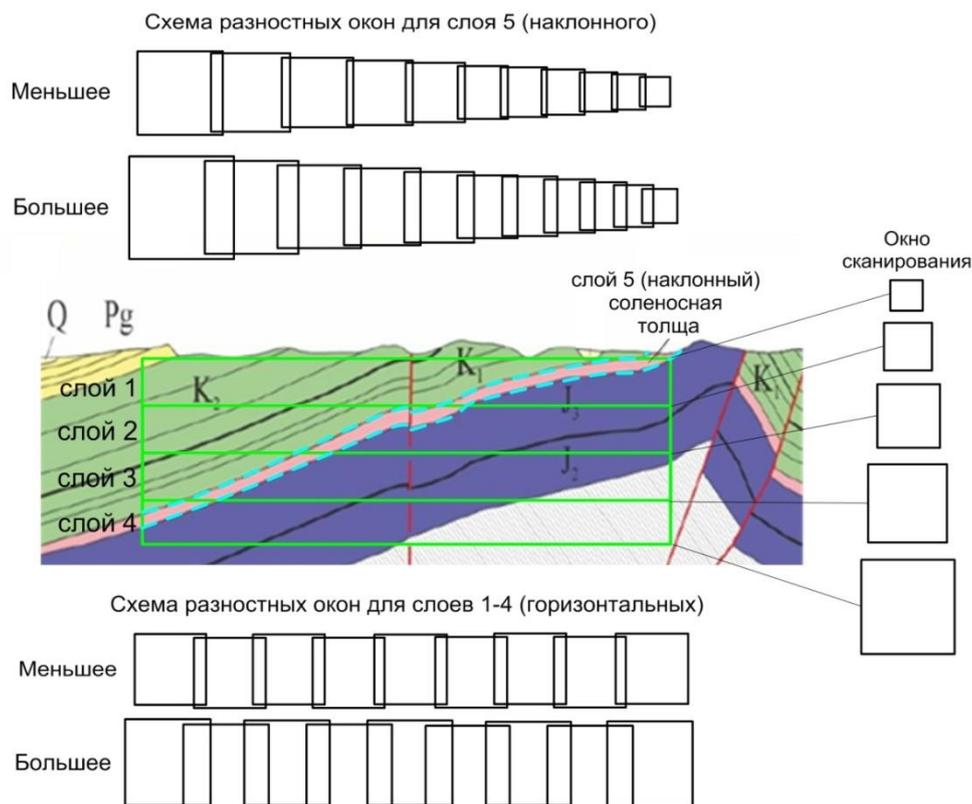


Рис. 2. Схема построения разностных окон при наклонном залегании изучаемого пласта

Кровля и подошва слоя в природе почти никогда не залегают синхронно, т.е. с одинаковой мощностью слоя. Разностная карта, полученная по слою с неравномерной мощностью, неизбежно станет прямым отражением переменной толщины изучаемого слоя. Т.е. на этой карте будет сочетание как первого, так и второго указанных выше гравитационных эффектов, что сделает ее непригодной для содержательной интерпретации. В районе утолщения слоя мы увидим положительную аномалию, в районе утончения, соответственно, отрицательную.

Избавить разностную трансформанту от эффекта неравномерной мощности слоя (структурного) предлагается следующим образом. Выбираем наименьшую мощность толщи H_{\min} , вычитаем это значение из отметок поверхности кровли, получаем новую криволинейную поверхность.

Таким образом в разностной карте заменяем реальную подошву на вычисленную, параллельную кровле. Полученный новый слой находится «внутри» изучаемой толщи. На данном примере изучаемый слой оказался достаточно тонким. Известно, что минимальное приращение разностных окон имеет ограничение. В связи с этим толщина слоя увеличена прибавлением 50 м к отметкам кровли и вычитанием 50 м из отметок новой подошвы рассматриваемого слоя (синяя заштрихованная область на рис. 3).

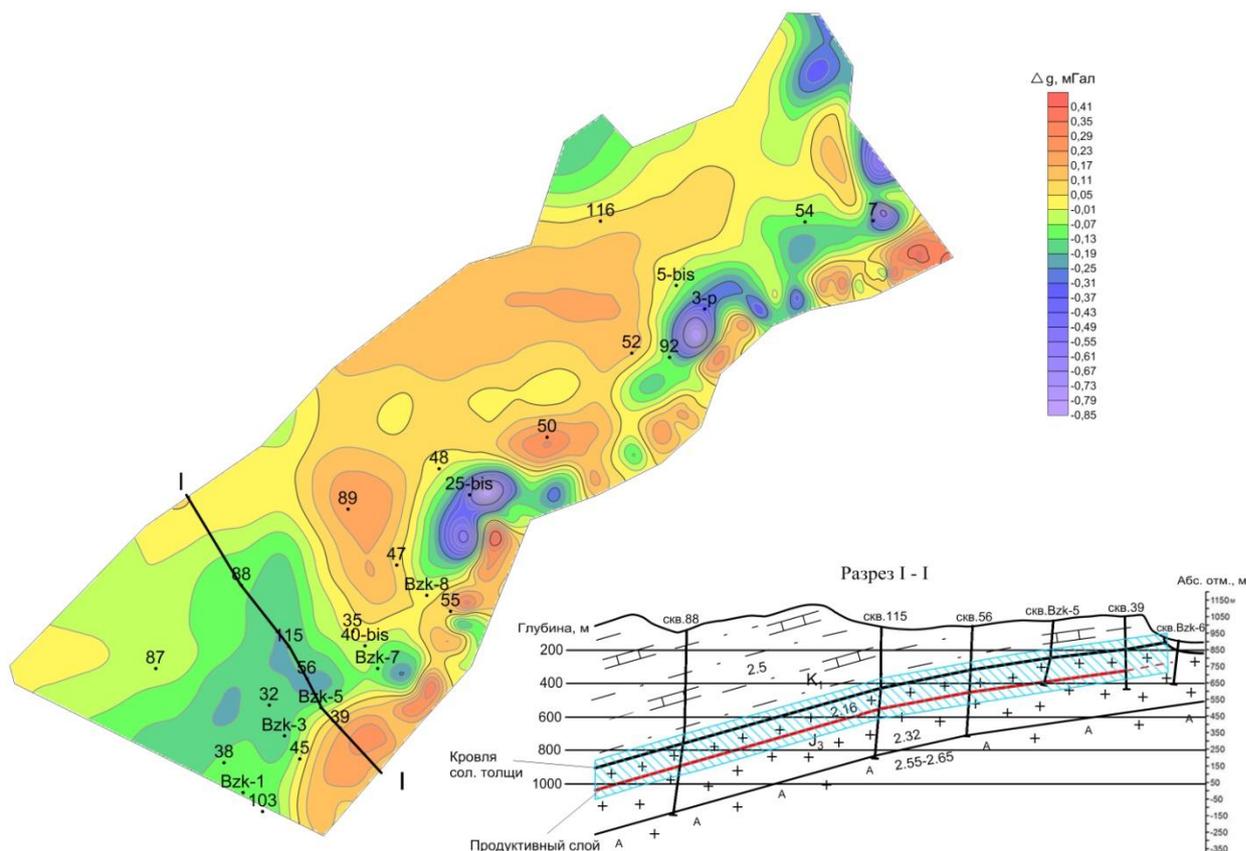


Рис. 3. Разностная трансформанта гравитационного поля по наклонной толще в интервале глубин «кровля соляной толщи – продуктивный слой», отражающая плотностное строение ВЗТ

Новая трансформанта заменяет собой четыре разностные плоскопараллельные карты и упрощает процесс интерпретации. Описанные изменения реализованы в одной из версий программы «Вектор» [5].

Выводы

Ранее считалось, что важной характеристикой векторного метода обработки гравитационного поля является возможность получать начальные представления о плотностном строении недр без привлечения какой-либо априорной геологической информации. В программу в качестве исходных данных закладываются лишь координаты пункта наблюдений и измеренное в нем значение потенциального поля. После получения картины распределения аномалий (источников) в пространстве происходит сопоставление полученных двумерных и трехмерных трансформант с геологическими данными (если таковые есть в наличии). Такая качественно-количественная интерпретация

поля полезна для лучшего понимания геологии изучаемого района. Теперь появилась возможность внесения дополнительных параметров, таких как структурные карты, получение по результатам данных бурения скважин или карт ОГ по данным сейсморазведки. Получение конечного результата теперь предусмотрено с учетом вышеперечисленных данных, что можно назвать элементом комплексирования геофизических методов – сейсморазведки и гравиметрии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000398-0).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Вектор Владимира Марковича Новоселицкого // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 49-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова / ИГФ УрО РАН. – Екатеринбург, 2023. – С. 70-73.
2. Щербинина Г.П. История создания методики «ВЕКТОР» // Горное эхо. – 2008. – № 3-4 (33-34). – С. 63-65.
3. Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Щербинина Г.П. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе VECTOR // Физика Земли. – 2006. – № 6 – С. 90-96.
4. Фан Т.Х., Петров А.В., До М.Ф. Исследования применения алгоритма двумерной фильтрации в скользящих окнах «живой» формы. Применение в центральной области Вьетнама // Новые идеи в науках о Земле: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. В 7 т. – М., 2021. – Т. 4. – С. 339-343.
5. Тарантин М.В. Технологическое развитие системы «Вектор» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ИИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 163-165.

УДК 004.42, 550.34.01

DOI:10.7242/echo.2023.3.14

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

М.В. Тарантин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Исследовательские работы требуют гибкого обрабатывающего алгоритмического обеспечения. Наиболее крупные этапы процедуры работы с материалами реализованы в программных модулях, каждый из которых со временем подвергается модернизации в соответствии с наиболее результативными алгоритмами. Представлены некоторые современные модули, предназначенные для решения ряда задач, возникающих в процессе обработки волновых материалов, указаны их основные отличия от прежних версий. Разработанные модули совместимы между собой по способам обработки материалов и форматам внешних файлов.

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка, цифровая обработка, алгоритм.

Обработка и интерпретация сейсмических материалов проводится с применением специализированного программного обеспечения, представленного единым модулем либо некоторым комплексом модулей. Исследовательские работы, как правило, требуют второго варианта обработки, поскольку позволяют вносить небольшие изменения на отдельных этапах сообразно выбранной методике при сравнительно малых потерях вре-