

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВЕКТОР



С.Г. Бычков,
кандидат геолого-
минералогических наук,
заведующий лабораторией
геопотенциальных полей,
Горный институт УрО РАН



А.С. Долгаль,
доктор физико-математических
наук,
ведущий научный сотрудник,
Горный институт УрО РАН



Г.П. Щербина,
кандидат геолого-
минералогических наук,
ведущий научный сотрудник,
Горный институт УрО РАН



Г.В. Простолупов,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Горный институт УрО РАН

*Светлой памяти
Владимира Марковича Новоселицкого*

Создан принципиально новый метод обработки и интерпретации потенциальных полей, основанный на трансформациях векторов полного горизонтального градиента. Векторная трансформация и сканирование поля векторов с процедурой их последующего интегрирования (восстановления поля) позволяют провести детальное разделение источников аномалий в плане и по глубине с привязкой каждого источника к шкале эффективных глубин. Результатом таких трансформаций является модель строения геологической среды, адекватная наблюдаемому полю. Эффективность системы подтверждена многочисленными результатами ее практического использования для решения задач нефтегазовой и горнодобывающей промышленности.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения гравитационного поля и интерпретация полученных аномалий силы тяжести позволяют получать сведения о распределении неоднородных по плотности масс в земной коре и таким образом охарактеризовать строение изучаемо-

го объема геологической среды. Гравиметрические съемки применяются для решения широкого круга геологических задач как картировочного, так и прогнозно-поискового характера, в том числе в области поисков и разведки нефтяных, газо-

вых, калийных и других месторождений, обеспечения безопасности горнопромышленных предприятий, инженерных изысканий, исследований геодинамических явлений и оценки влияния техногенных воздействий на окружающую среду.

Геолого-экономическая эффективность гравиметрии определяется как детальностью и точностью полевых наблюдений, так и информативностью методов, применяющихся при интерпретации полученных данных. Одним из основных методов интерпретации данных гравиметрической съемки в Пермском крае является созданная в Горном институте Уральского отделения РАН под руководством профессора В.М. Новоселицкого уникальная компьютерная технология VECTOR, реализующая томографический подход к извлечению информации из результатов полевых наблюдений.

Томографический подход – это современное направление в интерпретации геопотенциальных полей, основанное на применении фильтрационных или аппроксимационных алгоритмов приближенного восстановления послойного распределения петрофизических параметров при минимуме априорной информации о возмущающих объектах. Как правило, эти алгоритмы используют сеточные модели геологической среды; обеспечивают обработку больших объемов исходных данных при сравнительно малых затратах машинного времени; допускают многовариантное построение пространственных распределений петрофизических неоднородностей; их программная реализация предусматривает разнообразные способы визуализации полученных результатов (трехмерные диаграммы, их вертикальные и горизонтальные сечения и т.п.).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ VECTOR

В начале 1980-х годов коллективом исследователей (А.С. Маргулис, М.С. Чадаев, В.А. Кутин и др.) под руководством проф. В.М. Новоселицкого [8, 9] были заложены основы метода векторного сканирования, реализованного в компьютерной системе VECTOR. Одним из основных достоинств системы VECTOR, которая определила ее успешное использование в практике геофизических работ, является возможность получения трехмерной картины распределения физических свойств горных пород и локализации источников аномалий в трехмерном геологическом пространстве.

Система VECTOR базируется на устойчивом вычислении векторов горизонтальных градиентов, их обработке, трансформациях и последующем интегрировании с выделением разноглубинных компонент поля. При проведении векторной обработки площадь исследований покрывается сетью треугольников. Вершинами треугольников являются точки наблюдения, а контуры треугольников многократно перекрываются. Вычисленный полный вектор горизонтального градиента аномалии силы тяжести $G_{\text{набл}}$ относится к точке

пересечения медиан треугольника. Векторы горизонтальных градиентов являются первичным и основным материалом для дальнейших трансформаций поля. Управляя процессом триангуляции, можно производить интерпретацию с требуемой детальностью, заполнять пропуски в сети наблюдений и т.д.

Дальнейшие трансформации поля проводятся для дискретных множеств горизонтальных градиентов. Осреднение в скользящем окне с учетом направления вектора позволяет разделить поле на локальную и региональную составляющие, последующее интегрирование которых дает восстановленное гравитационное поле. Эффект подавления влияния глубинных источников при векторном сканировании объясняется различным характером убывания при удалении от источника самого поля и его градиента (производной). Поскольку градиент убывает значительно быстрее, а осреднение в скользящем окне производится с учетом направления вектора горизонтального градиента, то при последующем интегрировании влияние приповерхностных источников подавляется значительно сильнее, чем

при обычном осреднении поля для окна того же размера.

Результаты векторной обработки гравиметрических данных могут быть представлены в следующем виде:

1) карты векторов полного горизонтального градиента аномалий поля силы тяжести (аномальная и региональная составляющие) при различных значениях коэффициента трансформации (размерах окна сканирования);

2) карты модулей векторов полного горизонтального градиента аномалий поля силы тяжести (аномальная и региональная составляющие);

3) карты восстановленного из градиентов поля аномалий силы поля тяжести (аномальная и региональная составляющие).

Карта локальной составляющей поля отражает гравитационный эффект слоя пород от земной поверхности до некоторой эффективной глубины $h_{эфф}$, определяемой коэффициентом трансформации k ; карта региональной составляющей – эффект бесконечного на глубину слоя с кровлей, расположенной на глубине $h_{эфф}$. Понятие «эффективной глубины» $h_{эфф}$ введено создателями системы векторного сканирования [8] чтобы не путать ее с истинной глубиной источников поля. Коэффициент трансформации k является относительным размером окна сканирования и изменяется от 0 до 1. Максимальное значение $k = 1$ соответствует полным размерам площади съемки; $k = 0,5$ означает, что величина окна осреднения равна половине площади съемки и т.д.

Следующим этапом разделения компонент поля, реализованным в системе VECTOR, является получение разностных карт. На основе решения задач определения полей от полупространств, ограниченных сверху уровнями $h1_{эфф}$ и $h2_{эфф}$, становится возможным выделить гравитационный эффект от источников, локализованных в горизонтальном слое между этими глубинами. Глубины кровли $h1_{эфф}$ и подошвы $h2_{эфф}$ слоя (а следовательно, и его толщина) для каждой разностной карты определяются двумя коэффициентами трансформации. Специаль-

ные приемы обработки, основанные на решении линейной обратной задачи гравиметрии, позволяют оценивать по разностным картам поля избыточные плотности в заданном горизонтальном слое горных пород.

Принципиально новый способ представления результатов трансформации данных гравиметрической съемки – трехмерные диаграммы поля. Эти построения могут осуществляться как на базе карт модулей градиентов и карт восстановленного из градиентов поля Δg – трехмерные интегральные диаграммы гравитационного поля, так и на базе карт разностей модулей градиентов и карт разностей восстановленного поля – трехмерные разностные диаграммы гравитационного поля. Последние можно считать 3D-диаграммами распределения квазиплотности геологической среды [7, 11, 12]. Построение 3D-диаграмм полей, а также их горизонтальных и вертикальных срезов позволяет локализовать источники аномалий в пространстве. При этом по желанию интерпретатора могут быть выбраны те или иные формы представления результата, наилучшим образом отражающие исследуемые геоплотностные неоднородности.

Ось глубин Z на трехмерной диаграмме распределения поля при векторном сканировании отражает значения коэффициента трансформации, который зависит от параметров окна сканирования и размеров исследуемой площади. Таким образом, оценки глубин размещения аномалиеобразующих объектов носят приближенный характер.

Для количественной оценки глубин залегания геоплотностных неоднородностей разработан метод «погружения» в трехмерную диаграмму поля точечного (сингулярного) источника, создающего на земной поверхности аномалию, соизмеримую с наблюдаемой. Затем его известная глубина сопоставляется с различными значениями коэффициентов трансформации [8].

На рис. 1 представлен пример определения «оптимального» коэффициента трансформации $k_{опт}$ на модельном примере гравитационного поля, обусловленно-

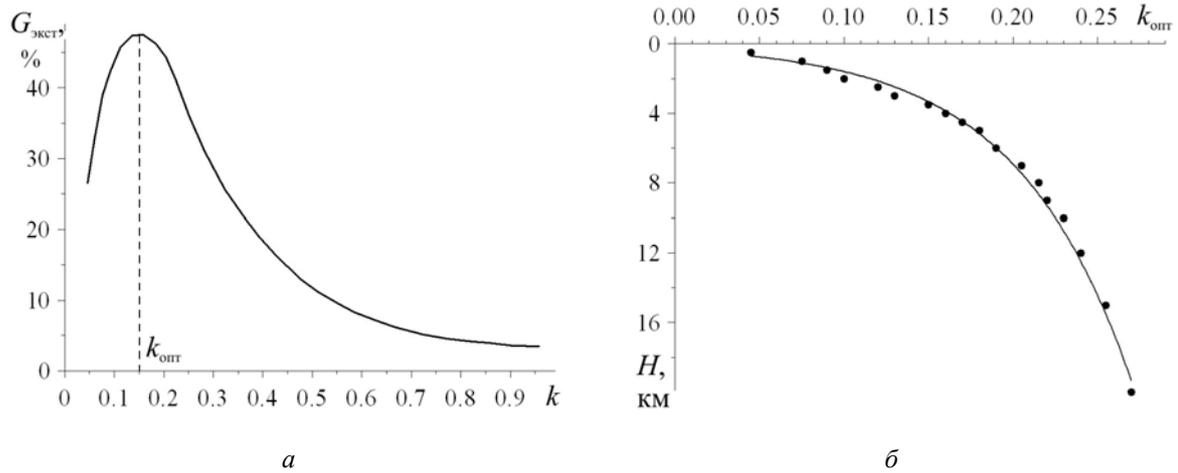


Рис. 1. Глубинная характеристика векторного сканирования гравитационного поля: а – определение оптимального коэффициента трансформации для поля точечного источника; б – зависимость $k_{\text{опт}}$ от фактической глубины источника

го точечным источником. «Оптимальным» назовем коэффициент, при котором в трансформированном поле наилучшим образом проявляется искомая аномалия. По максимуму графика зависимости величины относительного экстремума поля $G_{\text{экст}}$ от коэффициента трансформации k (рис. 1, а) можно однозначно определить «оптимальный» коэффициент $k_{\text{опт}}$ для данного модельного источника. Построив такие графики для различных глубин залегания, можно установить зависимость $k_{\text{опт}}$ от глубин размещения источников (рис. 1, б). Отчетливо видна нелиней-

ность зависимости между фактической глубиной сингулярного источника и коэффициентами трансформации. С увеличением глубины, как и следовало ожидать, разрешающая способность метода векторного сканирования уменьшается.

Томографическая интерпретация на основе представленных выше алгоритмов может быть использована для получения информации о пространственном распределении источников любого потенциального поля (магнитного, теплового, стационарного электрического и т.п.)

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ VECTOR

Система VECTOR уже более 20 лет успешно используется для интерпретации материалов гравиметрических съемок, что позволило получить принципиально новую информацию о строении недр. Приведем некоторые примеры применения системы для решения различных геологических задач.

Региональные геофизические работы. В настоящее время в Пермском крае, как и во всех старых нефтедобывающих регионах, актуальна проблема поисков новых перспективных территорий и объектов. Наиболее важные исследования слабоизученных земель выполнены на территории края за последнее десятилетие. В том числе в 2003–2008 гг. выполнено более 7 000 км региональных про-

филей в западных, северных и восточных районах Пермского края (рис. 2).

Система VECTOR успешно применяется при интерпретации ранее выполненных гравиметрических съемок различного масштаба, а также при обработке и интерпретации материалов гравиметрических съемок, проводимых Горным институтом УрО РАН в различных районах Пермского края, в Оренбургской, Кировской и других областях при выполнении подпрограммы «Минерально-сырьевые ресурсы» федеральной целевой программы «Экология и природные ресурсы России» (2002–2010 гг.). Результатом комплексных зонально-региональных работ является оценка ресурсов углеводородов, обоснование участков для последующего

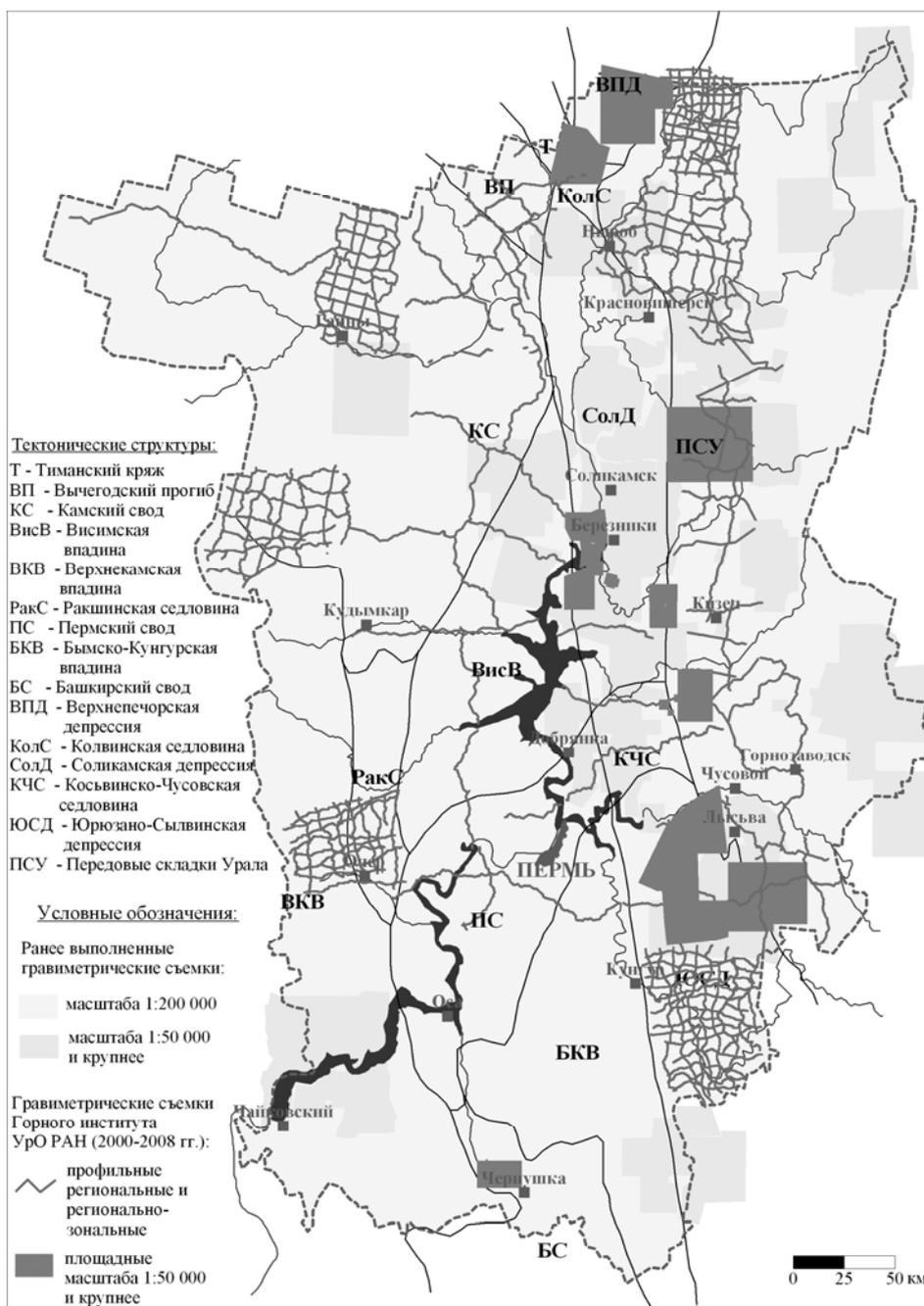


Рис. 2. Гравиметрические исследования на территории Пермского края по состоянию на 1.01.09 г.

лицензирования и рекомендации по дальнейшему ведению геологоразведочных работ.

Выявление нефтеперспективных объектов по гравиметрическим данным. Возможности системы VECTOR при изучении нижнефранско-турнейских рифогенных массивов хорошо видны на примере выделения локальных аномалий силы тяжести, обусловленных Бельской структурой (рис. 3). При традиционном способе выделения локальной (остаточ-

ной) компоненты поля с использованием осреднения в скользящем окне размерами 2×2 км (рис. 3, а) какой-либо аномалии, обусловленной рифогенным массивом, не наблюдается.

На полученном в системе VECTOR горизонтальном срезе поля, соответствующем глубине залегания нижнефранско-турнейских отложений (рис. 3, б), отчетливо выделяется изометричная аномалия, созданная не только самой Бельской структурой, но и ее юго-восточным про-

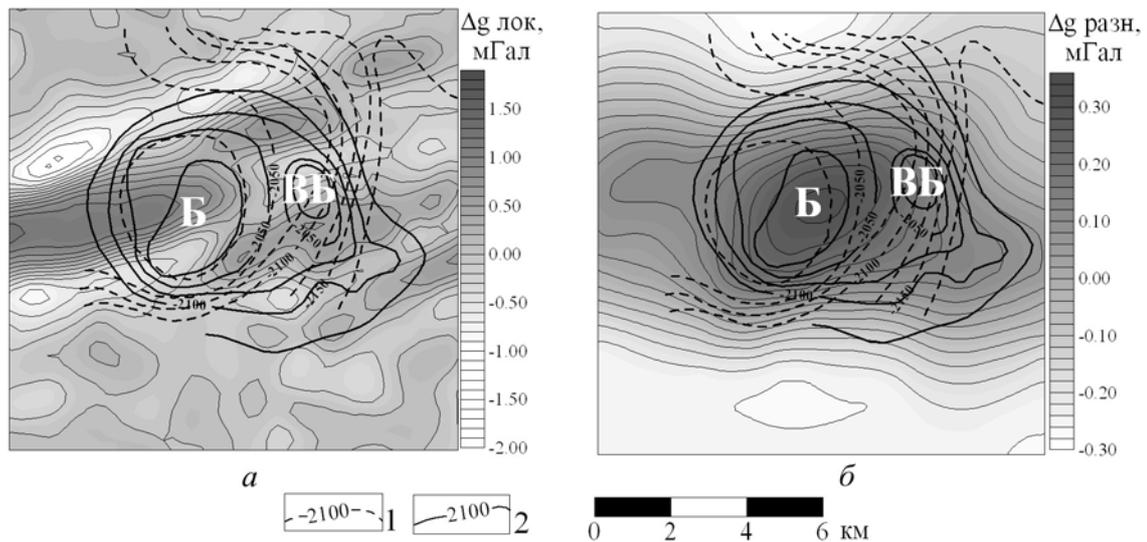


Рис. 3. Сравнительные результаты интерпретации гравиметрических материалов на Бельском участке: а – карта локальной составляющей, б – горизонтальный срез поля, построенный с применением системы VECTOR; 1 – структурная карта по данным сейсморазведки 1997 г.; 2 – структурная карта по данным сейсморазведки 2000 г. (Б – Бельское, ВБ – Восточно-Бельское поднятия)

должением. Сейсморазведочные работы, проведенные здесь позднее, подтвердили наличие этого продолжения и выявили отдельную структуру – Восточно-Бельское поднятие.

На рис. 4 приведено вертикальное сечение трехмерной диаграммы, где отчетливой положительной аномалией выделяется верхнедевонский рифогенный массив.

Решение горно-геологических задач. На Верхнекамском месторождении калий-

ных солей (ВКМКС) гравиметрические работы проводятся с целью выявления плотностных неоднородностей соляной и надсоляной толщ для обеспечения безопасности проведения горных работ [5].

В рамках технологии VECTOR создана методика интерпретации динамических аномалий силы тяжести, полученных при повторных (мониторинговых) наблюдениях на основе разности рассчитанных горизонтальных градиентов поля. В связи с этим появилась возможность

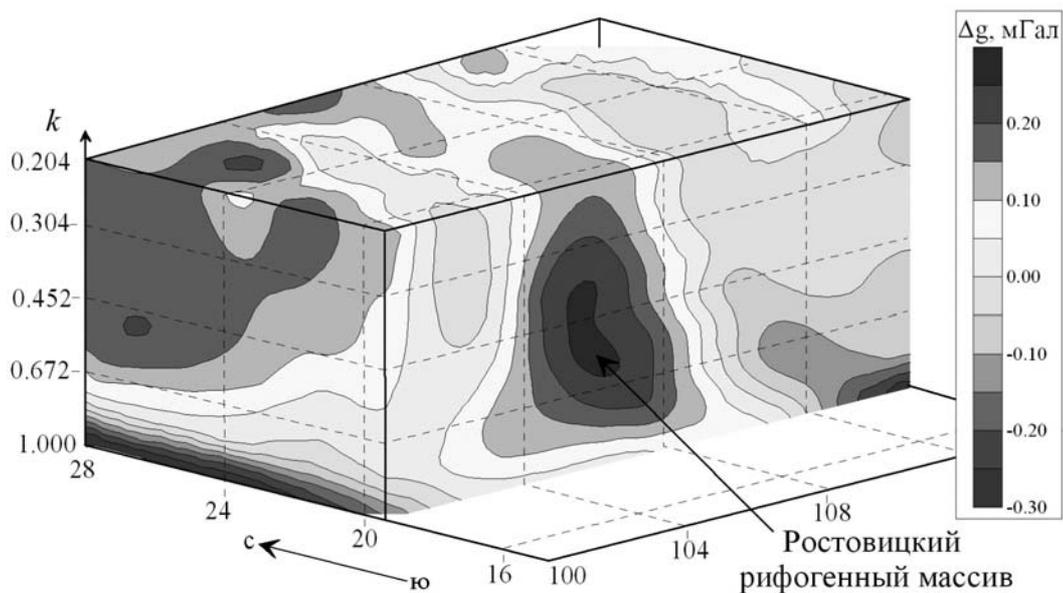


Рис. 4. Пример отражения верхнедевонского рифогенного массива на 3D-диаграмме гравитационного поля

проводить послойный анализ динамической аномалии в интерактивном режиме, т.е. рассчитывать разностные трансформанты поля для заданных эффективных глубин $h_{эфф}$, строить вертикальные и горизонтальные сечения 3D-диаграмм.

Рассмотрим методику анализа динамических аномалий на примере интерпретации повторных гравиметрических наблюдений масштаба 1:10 000, выполненных в юго-восточной части шахтного поля БКПРУ-1 в период с 2001 по 2005 г. Сопоставление разностных трансформант гравитационного поля свидетельствует о том, что выявленная в 2001 г. область аномального поля в 2005 г. стала обширнее и интенсивнее (рис. 5). Эти материалы свидетельствуют о происходящих в период с 2002 по 2005 г. геологических

процессах разуплотнения пород соляной и надсоляной толщи.

Решение инженерных и экологических задач. В г. Перми после сооружения пристроя к дому по ул. Советская, 28, началось его оседание, в стенах дома образовались и стали увеличиваться трещины, возникла опасность для жизни проживающих в нем людей. Детальная гравиметрическая съемка показала наличие в районе старого дома и пристроя области разуплотнения, локализуемой на глубине до 15 м (рис. 6). Данные инженерно-геологических скважин говорят о наличии на этом участке заторфованных и текучих грунтов, которые обладают низкой плотностью. В результате интерпретации гравиметрической съемки определены границы опасного участка.

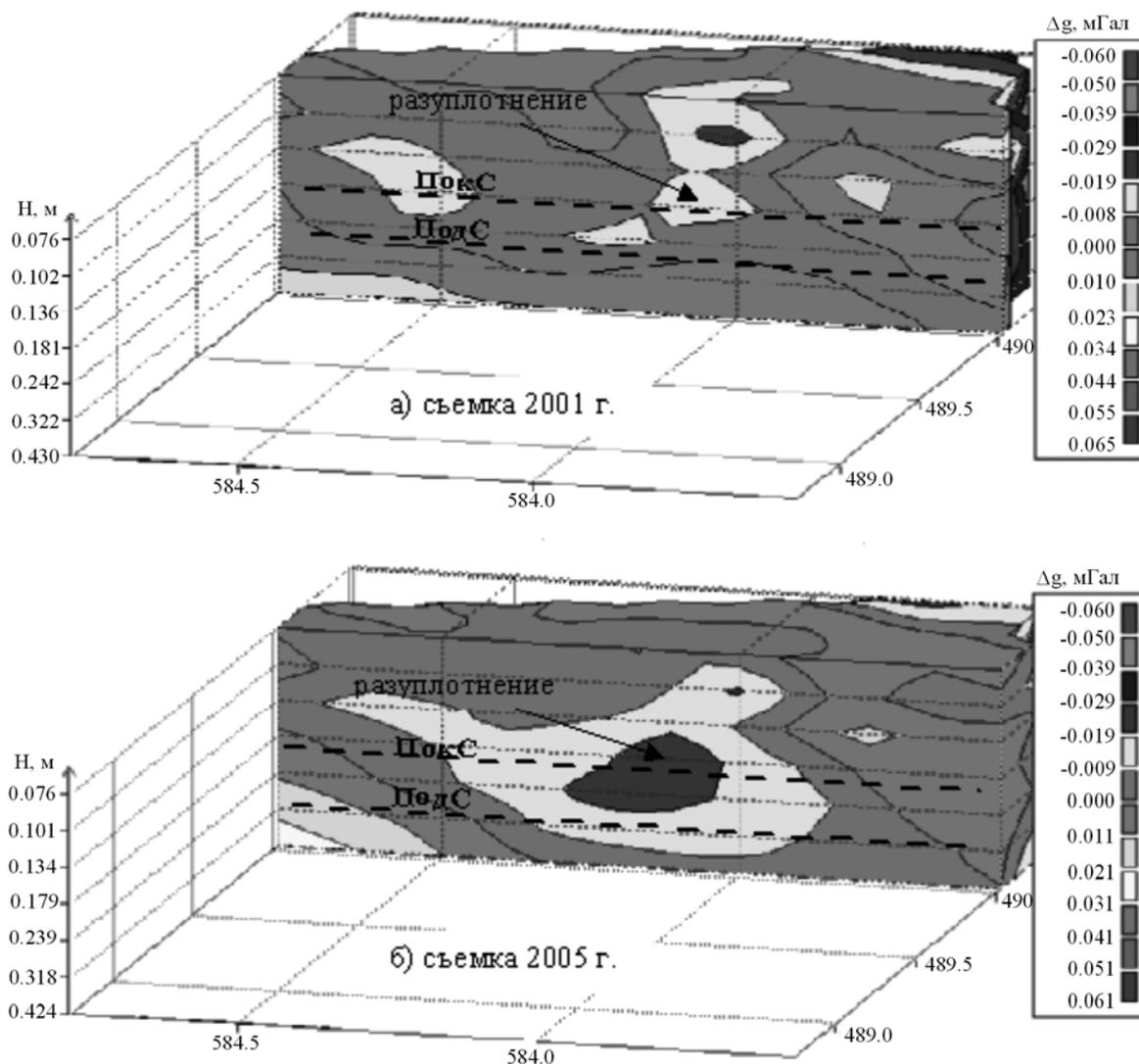


Рис. 5. Вертикальные сечения 3D-диаграммы гравитационного поля по результатам гравиметрических съемок на юго-восточной части шахтного поля БКПРУ-1 в 2001 г. (а) и в 2005 г. (б)

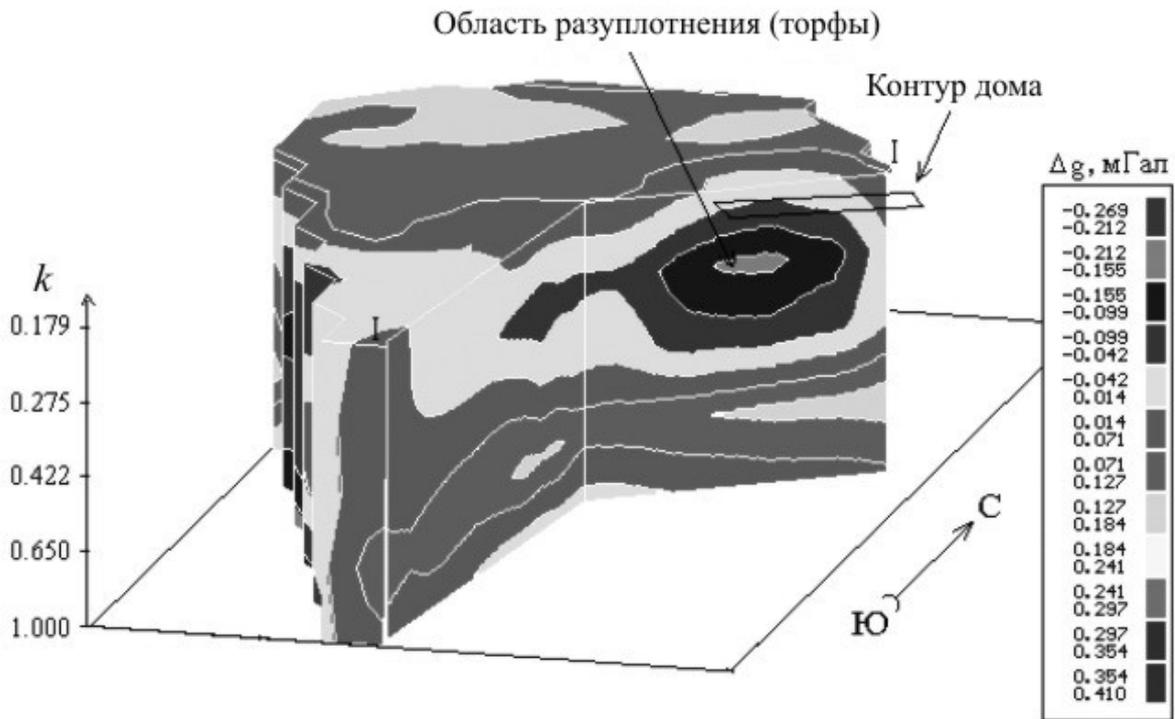


Рис. 6. Проявление зоны разуплотнения на трехмерной диаграмме гравитационного поля

С целью интенсификации добычи на Гежском месторождении нефти, расположенном на северо-востоке Пермского края, в 1981–1987 гг. были произведены ядерные взрывы. С 1993 г. на месторождении проводились комплексные исследования по Программе ВС РФ «Разработка рекомендаций по предотвращению опасных экологических последствий подземных ядерных взрывов...», в комплекс

исследований входила детальная гравиметрическая съемка.

По результатам интерпретации гравиметрических материалов было установлено, что подземные ядерные взрывы образовали существенные зоны изменения плотности горных пород в недрах (рис. 7). Вместе с естественными зонами уменьшенной плотности, расположенными в своде поднятия, техногенные зоны

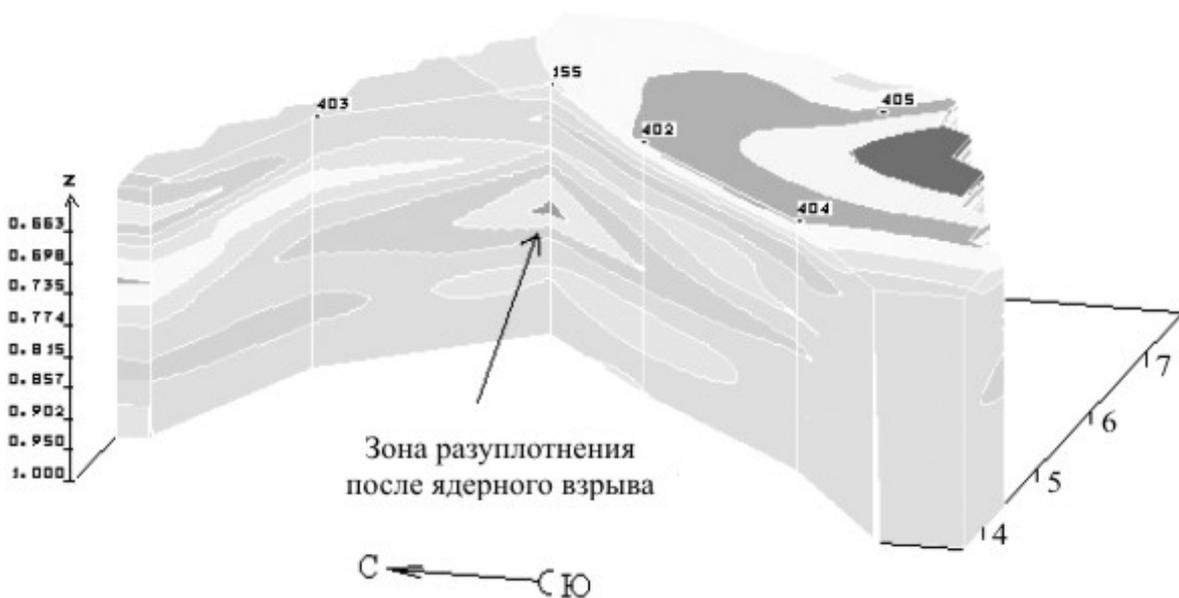


Рис. 7. Трехмерная квазиплотностная диаграмма после ядерного взрыва на Гежском месторождении нефти

образуют сложную систему каналов повышенной пористости и трещиноватости, по которой возможна миграция радионуклидов вместе с флюидами к земной поверхности. Все выявленные газохимической съемкой аномалии по тяжелым углеводородам в центральной части Гежского месторождения приурочены именно к этим участкам.

Проведенный комплекс исследований, направленный на уточнение возможных путей распространения и мест аккумуляции продуктов взрывов внутри горного массива, а также на земной поверхности, способствовал улучшению организации радиометрического контроля и повысил эффективность защиты от радиоактивных загрязнений.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

Аппроксимация геопотенциального поля системой истокообразных функций, представляющих собой поля эквивалентных источников, широко применяется при решении широкого круга интерпретационных задач в методах гравиметрии и магнитометрии [1, 6, 15 и др.]. Весьма эффективным является использование данного подхода для интерполяции и трансформации полей. Академик В.Н. Страхов считает, что аналитические аппроксимации являются одним из приоритетных направлений в развитии теории и практики интерпретации геофизических данных в XXI веке [14, 15 и др.].

Общий принцип реализации аппроксимационного подхода к построению аналитической модели геопотенциального поля выглядит следующим образом [6].

1. Исходное поле аппроксимируется модельным полем, обусловленным некоторой совокупностью элементарных источников. Выбранная совокупность источников должна описываться небольшим количеством параметров, определяющих физические и геометрические характеристики тел, а также обеспечивать высокую степень близости исходного и модельного полей. В вычислительном плане данная задача сводится к решению системы линейных уравнений с приближенно заданной правой частью.

2. Все последующие преобразования поля сводятся к решению прямой задачи от построенной аппроксимационной конструкции в произвольно заданных точках, лежащих вне источников поля. При этом обеспечивается оптимальное по точности восстановление значений поля или его

производных на любой вышележащей (по отношению к источникам) поверхности.

Аппроксимационная конструкция позволяет вычислять значения горизонтальных градиентов гравитационного поля на различных уровнях H_1, H_2, \dots, H_N , заменяя процедуры триангуляции и численного дифференцирования «классического» векторного сканирования, а затем проводить вычисление составляющей поля от слоя, ограниченного глубинами $h_{эфф}^{k-1}$ и $h_{эфф}^k, k = 1, 2, \dots, (N - 1)$, вместо осреднения в скользящих окнах [10].

Пересчет потенциального поля на высоту H в спектральной области близок осреднению в скользящем окне с радиусом $R \approx 3,5 H$ (рис. 8). Учитывая, что операция пересчета поля в верхнее полупространство, в отличие от осреднения, характеризуется отсутствием резонансных явлений, она при определенных параметрах весьма близка к оптимальной фильтрации (фильтр Колмогорова – Винера) [3]. Кроме того, вычисление производных на высоте H является полосовым фильтром [4] и, как следует из его частотной характеристики (рис.8), позволяет выделять полезный сигнал в заданной области спектра, подавляя высокочастотные и низкочастотные составляющие поля.

На практике представленные на рис. 8 частотные характеристики различных трансформаций из-за использования скользящих окон, краевых эффектов и дискретности задания поля обладают периодичностью [4], что может привести к появлению ложных аномалий на резонансных частотах. Трансформанты поля,

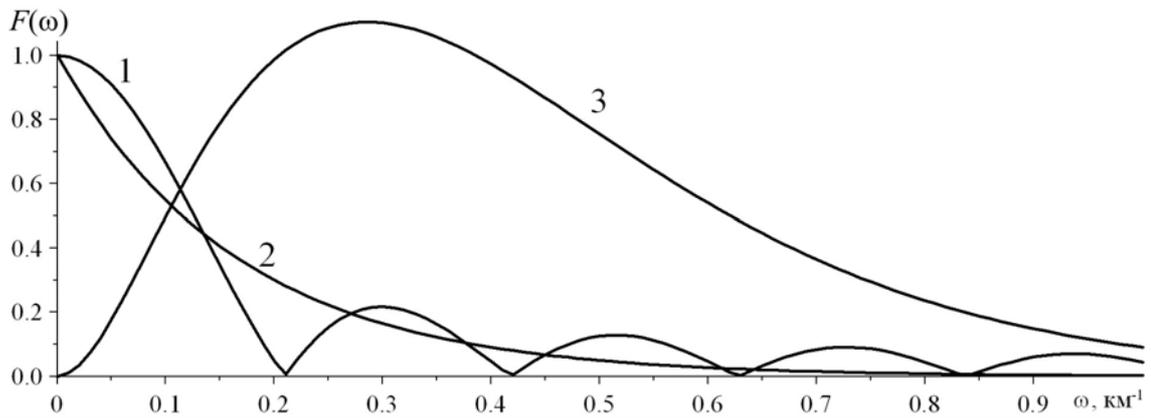


Рис. 8. Частотные характеристики различных трансформаций: 1 – осреднение в скользящем окне; 2 – пересчет на высоту; 3 – вычисление производных на высоте (по К.В.Гладкому)

получаемые путем решения прямой задачи от совокупности эквивалентных источников, не несут в себе такого рода искажений.

Новая аппроксимационная модификация системы VECTOR реализована в виде соответствующей программы и опробована для решения ряда практических задач (рис. 9). Как видно из сравнения «классической» (рис. 9, а) и «аппроксимационной» (рис. 9, б) модификаций векторного сканирования, в целом, морфология разностных трансформант очень близка, од-

нако при векторном сканировании поле получается более сглаженным, теряются мелкие аномалии, отражающие особенности геологического строения территории.

Аппроксимационная модификация системы VECTOR характеризуется рядом преимуществ, которые заключаются в следующем:

- осуществляется эффективная фильтрация помех негармонического характера;
- выполняется строгий аналитический учет различий в уменьшении ампли-

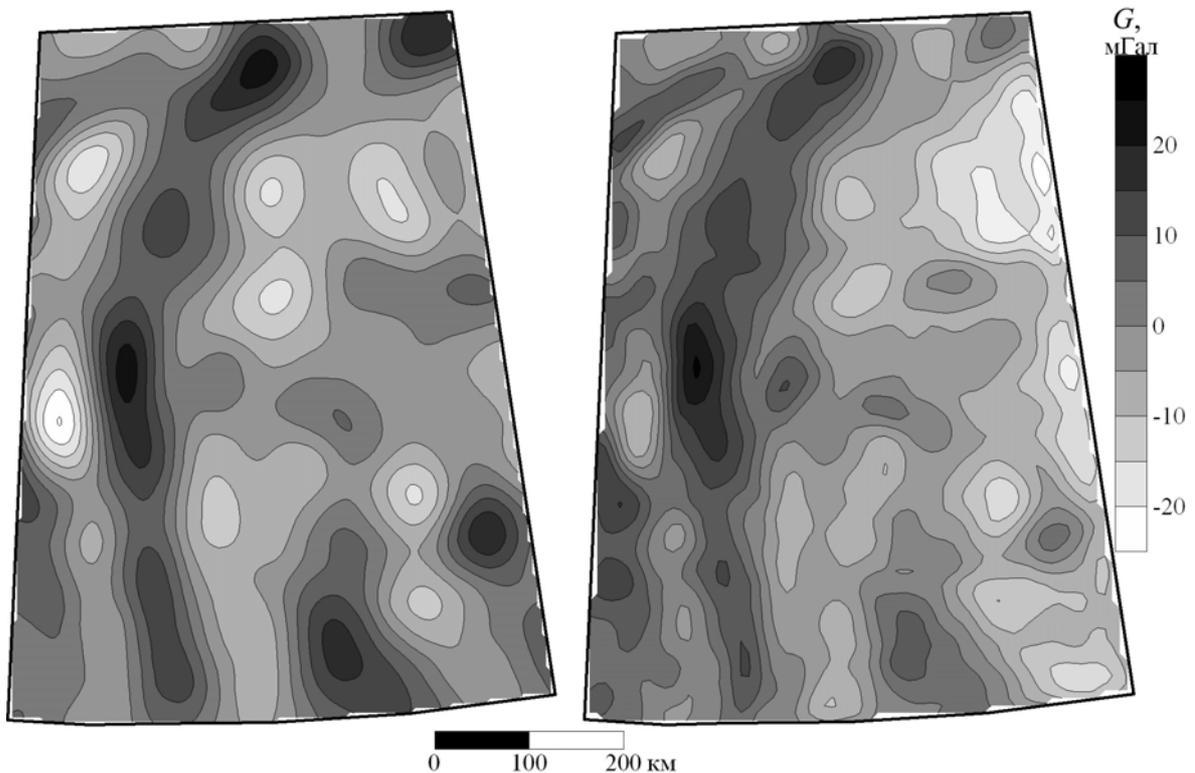


Рис. 9. Разностные аномалии поля силы тяжести, вычисленные: а – программой VECTOR при $k=0,3$ и $k=0,1$; б – пересчетом на высоты $H_1 = 15$ км и $H_2 = 30$ км

туды гравитационных и магнитных аномалий по мере удаления от источников;

- используется оптимальное по точности восстановление значений горизонтальных градиентов анализируемого поля в верхнем полупространстве;

- исключается влияние разновысотности точек измерений на величину горизонтальных производных;

- отсутствуют искажения трансформант, связанные с использованием преобразований поля, заданного по неравномерной сети дискретных точек, в скользящих окнах;

- разделение аномального магнитного поля (ΔT) на составляющие происходит с учетом направления вектора нор-

мального магнитного поля Земли;

- имеется возможность контроля точности численного интегрирования при восстановлении поля по значениям горизонтальных градиентов;

- обеспечивается возможность одновременной обработки больших массивов информации (>105–106 точек задания поля).

Дальнейшее развитие представленного подхода может идти в направлениях использования при разделении полей всех трех составляющих вектора градиента V_x , V_y и V_z и различных производных более высоких порядков (вплоть до тензорных компонент).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и успешно используется на практике принципиально новый томографический метод интерпретации потенциальных полей, основанный на трансформациях векторов полного горизонтального градиента. Векторная трансформация и сканирование поля векторов с процедурой их последующего интегрирования (восстановления поля) позволяют провести детальное разделение источников аномалий в плане и по вертикали (с использованием шкалы эффективных глубин). Результатом таких трансформаций является модель строения геологической среды, адекватная наблюдаемому полю. Система VECTOR представлялась на Международных и Всероссийских выставках и конференциях, имеет положительные отзывы от различных организаций, включая Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Эффективность системы подтверждена многочисленными результатами ее практического использования для решения задач нефтегазовой и горнодобывающей промышленности в Пермской и Волгоградской областях, в Республике Коми и Удмуртской Республике, в Ханты-Мансийском автономном округе, а также в других регионах.

Работа над системой векторного сканирования была поддержана грантами РФФИ 02-05-96408-р2002урал_a, 04-05-

96074-р2004урал_a, 07-05-96009, 07-05-96011 [2, 16]. Система имеет «Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ» № 2004611611 от 29.03.2004 г. в «Российском агентстве по патентам и товарным знакам». Томографическая интерпретация является неотъемлемой составляющей «Способа многокомпонентного гравиметрического моделирования геологической среды» (патент на изобретение № 2364895, зарегистрированный в Государственном реестре изобретений РФ 20 августа 2009 г.) [13].

Дальнейшее развитие томографического подхода к интерпретации геопотенциальных полей во многом обусловлено современными потребностями геофизической отрасли в оперативном анализе больших объемов цифровых данных и тесно связано с возросшими вычислительными возможностями компьютеров и новыми разнообразными приемами визуализации геоизображений. В дальнейшем, по нашему мнению, наиболее актуальными направлениями исследований в области гравитационной томографии являются:

- теоретическое изучение возможностей разделения аномальных эффектов, обусловленных множествами разноточностных объектов путем линейных преобразований суммарного по-

- тенциального поля, при различных статистических закономерностях пространственного распределения этих объектов;
- экспериментальная оценка возможностей тех или иных алгоритмов томографической интерпретации в типичных физико-геологических ситуациях путем имитационного моделирования и выполнения серии вычислительных экспериментов;
 - анализ процесса распознавания картографических образов, получаемых в результате гравитационной томографии с позиций геоиконики – науки о геоизображениях;
 - создание интерпретационных технологий, обеспечивающих эффективное комплексирование гравитационной (магнитной) томографии с другими методами интерпретации поля силы тяжести (в первую очередь – с решением обратных задач и распознаванием образов).

Библиографический список

1. *Аронов В.И.* Обработка на ЭВМ значений аномалий силы тяжести при произвольном рельефе поверхности наблюдений – М.: Недра, 1976. – 131 с.
2. Векторные трансформации геопотенциальных полей в задачах разведочной геофизики / *В.М. Новоселицкий* [и др.] // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2004 г. Аннотированные отчеты. Пермь, Екатеринбург, УрО РАН, 2005. – С. 250–253.
3. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике: справочник геофизика / под ред. *В.И. Дмитриева*. – М.: Недра, 1990. – 498 с.
4. *Гладкий К.В.* Гравиразведка и магниторазведка – М.: Недра, 1967. – 319 с.
5. Гравиметрические исследования изменений плотностной характеристики геологической среды под воздействием горных работ / *В.М. Новоселицкий* [и др.] // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 37–41.
6. *Долгаль А.С.* Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемки в горной местности – Абакан: ООО «Фирма-МАРТ», 2002. – 188 с.
7. Информационная технология содержательной интерпретации геопотенциальных полей / *С.Г. Бычков* [и др.] // Геоинформатика, 2004, № 1. НАНУ, Киев. – С. 33–42.
8. Метод векторного сканирования / *В.М. Новоселицкий* [и др.] // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. Пермь, Перм. у-т, 1998. – С. 54–59.
9. *Новоселицкий В.М., Маргулис А.С., Чадаев М.С.* Использование гравиметрической градиентной съемки для локализации плотностных неоднородностей // Геофизические работы при региональных и геологосъемочных исследованиях на Урале. – Свердловск, 1989. – С. 33–35.
10. *Новоселицкий В.М., Долгаль А.С., Бычков С.Г.* Новый алгоритмический базис технологии векторного сканирования геопотенциальных полей // Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов: материалы Междунар. конф., посв. 50-летию Института геофизики УрО РАН. – Екатеринбург, 2008. – С. 183–186.
11. *Новоселицкий В.М., Бычков С.Г.* Система «VECTOR» и результаты ее реализации // Горное эхо. Вестник Горного института, 2008. – № 3–4. – С. 53–63.
12. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе «VECTOR» / *Г.В. Простолунов* [и др.] // Физика Земли. – 2006. – № 6. – С. 90–96.
13. Способ многокомпонентного гравиметрического моделирования геологической среды: пат. № 2365895 С1, РФ, МПК G01V 7/00 (2006.01) / *Новоселицкий В.М., Бычков С.Г., Долгаль А.С., Чадаев М.С.*; заявитель и патентообладатель ГИ УрО РАН. – 2007146867/28; заявл. 17.12.2007; опубл. 20.08.2009, бюл. № 23.
14. *Страхов В.Н.* Три парадигмы в теории и практике интерпретации потенциальных полей (анализ прошлого и прогноз будущего) / *В.Н.Страхов* – М. ОИФЗ РАН, 1999. – 78 с.
15. *Страхов В.Н.* Что делать? (о развитии гравиметрии и магнитометрии в России в начале XXI века) – М.: ОИФЗ РАН, 1998. – 24 с.
16. Теория и компьютерная технология содержательной интерпретации трансформант геопотенциальных полей / *В.М. Новоселицкий* [и др.] // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2002 г. Аннотированные отчеты. Пермь, Екатеринбург, УрО РАН, 2003. – С. 281–285.