УДК 550.834.3(571.1)

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ ТРЕХМЕРНОГО ПЛОТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Мартышко П.С., Ладовский И.В., Колмогорова В.В., Цидаев А. Г., Бызов Д. Д. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. На основе грид технологий предложен способ организации входных данных для построения трехмерных плотностных моделей по двумерным скоростным разрезам и заданным на площади аномалиям гравитационного поля. Способ опробован на плотностной модели зоны сочленения Северного Урала и Тимано-Печерской плиты.

Трехмерное гравитационное моделирование, профили сейсмические, плотность, грид технологии, профильные сечения.

GRID FUNCTIONS TECHNIQUE FOR 3D SEISMIC-GRAVITY MODEL CONSTRUCTION

Martyshko P.S., Ladovskiy I.V., Kolmogorova V.V., Tsidaev A.G., Byzov D.D.– Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

Abstrakt. This paper describes grid technique for 3D density model constructing based on joint 2D seismic and 3D gravity data inversion. We processed data that had been collected between the Timan-Pechora plate and North Ural.

3D gravity modeling, seismic profile, density, grid technique, boundary section.

Введение

Современные технологии и требования к алгоритмам решения задач большой размерности требуют минимизации ручного труда на этапе подготовки исходных данных. Формализация данных геофизических исследований и их математическая обработка на первом этапе не должны содержать субъективного фактора. Последнему отводится решающая роль уже на этапе анализа полученных результатов (Красовский, 1989).

Обратные задачи сейсмоплотностного моделирования относятся к классу некорректно поставленных неустойчивых задач. Именно поэтому для них так важны плотностные модели начального приближения. Такие модели должны отражать общие особенности распределения плотности, а соответствующее им аномальное гравитационное поле должно в основных чертах повторять морфологию наблюденных аномалий.

С учетом этих требований разработана методика построения плотностных моделей литосферы по новой «сеточной» технологии на основе сейсмических скоростных разрезов. Методика рассмотрена на примере 4-х профилей в зоне сочленения Северного Урала и Тимано-Печорской плиты.

Плотностные модели по скоростным разрезам

Информационная база плотностной модели начального приближения включает три составляющие: поля времен по профилям ГСЗ и соответствующие им двумерные скоростные разрезы земной коры, эмпирическую корреляционную зависимость «плотность-скорость» и карты гравитационного поля в редукции Буге (в цифровом виде).

Проанализированы поля времен первых вступлений продольных волн и построены скоростные разрезы земной коры по Красноленинскому профилю ГСЗ и фрагментам геотраверсов: Агат-2, Кварц и Рубин-1. В основе примененного способа интерпретации лежит аппарат специальных полей времен и алгоритм решения по ним обратной кинематической задачи, в котором волны в первых вступлениях рассматриваются как рефрагированные (Мишенькина, Шелудько, Крылов, 1983). По данному алгоритму составлена модифицированная программа «Invers», предназначенная для вычисления матрицы специального вида функции скорости $V_P(x,z)$. С

использованием одного из вариантов схемы интерполяции (преимущественно триангуляции с линейной интерполяцией) построены сеточные «грид» файлы и соответствующие разрезы в изолиниях скорости.

Пересчет интервальных скоростей в плотности выполнялся по корреляционной кусочно-линейной зависимости «плотность-скорость», полученной на основе решения линейной обратной задачи гравиметрии по рассматриваемым профилям (Цидаев, Фадеева, Бызов, 2011):

$$\sigma(V) = \begin{cases} V - 0{,}05, & V < 2{,}35 \\ 0{,}113 \times V + 2{,}034, & 2{,}35 \le V < 5 \\ 0{,}2 \times V + 1{,}6, & 5 \le V < 7{,}75 \\ 0{,}25 \times V + 1{,}3 & 7{,}75 \le V < 8{,}4 \end{cases}$$

Подошва осадочного чехла характеризуется резким изменением скоростей в диапазоне от $V \in (2{,}2; 4)$ до $V \in (5{,}0; 6{,}0)$ км/с (Новоселицкий, Проворов, Шилова, 1985; Егоркин, 1991). Положение предполагаемой кровли мантии определялось скоростными уровнями 7,75 – 8,25 км/с (по скачку скорости или ее градиента) с привлечением имеющихся данных по опорным отраженным, обменным и головным волнам. Из-за ограниченной длины годографов построить разрез верхней мантии в изолиниях скорости не представляется возможным. Поэтому начальная скоростная модель верхней мантии составлена формально в виде однородных блоков, параметры которых задавались с учетом информации по первым вступлениям и уточнялись при решении прямой задачи гравиметрии.

Прямая задача гравиметрии для двумерных плотностных моделей рассчитывалась по специально разработанной программе «*V*-σ-CALC» для скоростных сеточных матриц с учетом кусочно-линейной зависимости «плотность-скорость». По каждому скоростному интервалу строилась часть плотностной матрицы, и вычислялся прямой гравитационный эффект объединенной матричной модели до глубины 80 км. При этом никакого дополнительного деления области на слои и блоки с постоянными плотностями не требуется.

Дополнительная геолого-геофизическая информация по профилям формализуется через физический параметр плотности, оцифровывается в заданном масштабе и включается в плотностные «грид-файлы» для последующих вычислений. Для выравнивания расчетного поля за пределами профиля модель продолжается двумя бесконечными полупластами с плотностями левого и правого краев двумерного разреза. Эффективность предложенного вычислительного алгоритма сделала возможным использовать интерактивную схему метода подбора для решения обратной задачи гравиметрии в реальном режиме времени.

По плотностным матрицам программа «LITOS» создает «грид» файлы распределения масс вертикальных столбов и файл литостатического давления до заданной глубины. Дополнительное граничное условие изостатической уравновешенности на глубине дает возможность при моделировании наметить контуры блоков компенсирующих масс и оптимизировать в них искомое распределение плотности (Мартышко и др., 2011).

В процессе моделирования анализировался гравитационный эффект от отдельных частей разреза: осадочного чехла, консолидированной земной коры и верхней мантии. Как правило, расчетное поле консолидированной коры соответствует наблюденным аномалиям Буге и повторяет морфологию распределения средней коровой скорости вдоль исследуемых профилей. Гравитационный эффект осадочного чехла компенсируется глубинными массами ниже границы М. Контуры мантийных блоков определялись по остаточным аномалиям гравитационного поля и уточнялись по характеру изменения аномалий литостатического давления на глубине. Плотность в мантийных блоках подбиралась в процессе решения линейной обратной задачи гравиметрии с учетом дополнительного условия изостатической компенсации на глубинном гипсометрическом уровне 80 км.

На рис. 1 (цветная вкладка) представлены двумерные плотностные модели на-

чального приближения земной коры и верхней мантии до глубины 80 км. Расчетное гравитационное поле моделей сопоставлено с наблюденными аномалиями Буге. Морфологическое сходство двух кривых вполне приемлемо на качественном уровне интерпретации. Легко можно добиться и количественного соответствия аномальных полей двумерных плотностных моделей. Невыбранные остатки гравитационных аномалий служат исходной информацией при решении нелинейной обратной задачи гравиметрии, опирающейся на двухэтапный метод автоматизированного подбора (Цирульский, Никонова, Федорова, 1980). Если же имеются весомые основания для привлечения дополнительной информации структурно-геологического плана, то ее можно учесть, вводя модельные фрагменты плотностных неоднородностей с последующим их уточнением на основе итерационного метода решения прямой задачи гравиметрии (Дружинин и др., 2000а).

Трехмерная плотностная модель начального приближения

Для успешной разработки эффективных алгоритмов трехмерного плотностного моделирования изначально требуется специфическая организация входных количественных данных. В рамках трехмерного подхода интерпретатор сталкивается с двумя принципиальными проблемами: введение поправки за трехмерное распределение плотности и устранение краевого эффекта затухания поля за пределами исследуемого региона.

Использование двумерных плотностных моделей для перехода к трехмерной конфигурации не требует высокоточного подбора гравитационного поля по отдельно взятым профилям. Вполне достаточно качественного совпадения расчетного поля разреза с реальной проекцией на профиль трехмерных аномалий наблюденного поля. По разрозненным профильным сечениям невозможно воссоздать реальную конфигурацию аномальных объектов в трехмерном пространстве. Как следствие, неизвестны и поправки в гравитационный эффект за трехмерное распределение плотности. Для изометрических тел приповерхностного залегания этот поправочный коэффициент весьма значителен. Так в ходе вычислительных экспериментов для моделей глубинного строения земной коры северо-восточной части Восточно-Европейской плиты (Костюченко, Романюк, 1997) и северной части Среднего Урала (Дружинин и др., 2000а) установлено, что поправка в гравитационный эффект за трехмерность модельных объектов достигает на некоторых профилях 100 и более процентов. Хотя подобные количественные оценки, на наш взгляд, кажутся несколько завышенными, подобное обстоятельство требует ревизии устоявшейся методики трехмерного моделирования с использованием профильных данных.

Аномальные гравитационные эффекты вычисляются на уровне фонового поля «нормальной» модели, неоднородной только по глубине. В таком случае расчетное поле будет постоянной величиной. Для исключения краевого эффекта затухания фонового поля необходимо адекватное пространственное продолжение аномалиеобразующих масс за внешние границы модельной области. Один из способов продолжения – увеличение длин расчетных профилей для двумерных плотностных моделей (Дружинин и др., 2000б). Если доступна информация для более обширного региона, то это снимает часть вопросов, хотя и значительно увеличивает объем подготовительных вычислений. Однако удлинение профилей не решает проблему в трехмерном варианте. В условиях практического отсутствия информации необходимо выполнить параметризацию масс законтурных блоков с привязкой к профильным значениям. Подобная процедура трудно формализуема и даже в случае ее успешной реализации приводит к перекосу фонового поля и образованию ложных краевых аномалий по контуру модельного планшета.

Одним из возможных вариантов работы с 2D-данными является сведение их на единый координатный цифровой планшет, например, планшет карты аномалий гравитационного поля, с последующей интерполяцией этих данных в межпрофильное про-

странство. Оптимальный путь перехода к технологии трехмерного моделирования – преобразование двумерного распределения плотности вдоль профильных сечений в формат сеточных функций. Инструментом технологической поддержки является лицензионный пакет Golden Software программ Grafer, Surfer и Voxler.

Граничные файлы формата (.bln) задают положение каждого из профилей на цифровом планшете карты гравитационного поля. Им сопоставляется набор стандартных сеточных файлов формата (.grd) двумерных плотностных моделей. Таким образом происходит переход от двумерного массива координат вдоль профильных сечений (с учетом их кривизны) к трехмерному координатному массиву объемной модели. Программа визуализации экспортирует данные как трехмерный «грид-файл» пакета Voxler и восстанавливает пространственное расположение профильных разрезов (рис. 2, цветная вкладка).

Далее происходит процесс заполнения ячеек сеточного куба интерполированными значениями плотности (Цидаев, 2011). Было решено использовать две интерполяционные схемы пакета Surfer: метод обратных расстояний с большим (3 и более) степенным показателем и метод триангуляции с линейной интерполяцией. Первый метод сориентирован на восстановление изометрии пространственного положения локальных объектов, второй – на обрисовку протяженных линейных структур по их профильным подсечениям. Интерполяция выполняется по отдельным горизонтальным слоям. Мощности слоев определяются шагом дискретизации по оси глубин, количество слоев – на единицу меньше количества дискретов разбиения. Результатом работы программы интерполяции является пакет сеточных «грид-файлов», содержащих горизонтальные слои четырехмерного (x, y, z, σ) куба, и XML-файл, в котором каждому слою сопоставлена глубина, на которой он расположен. Эти файлы служат исходными данными для программы визуализации пакета Voxler (рис. 3, цветная вкладка).

Построенный «цифровой куб» представляет собой трехмерную плотностную модель начального приближения для заданного участка площади и доступен для редактирования с возможностью получения информации по любому сечению вдоль образующей кривой граничного файла в формате (.bln). На его основе возможно построение карт горизонтальных срезов и структурных карт рельефа опорных плотностных границ.

На рис. 4 (цветная вкладка) представлены сечения вдоль профилей Рубин-1, Красноленинский и Кварц, построенные по граничным BLN-файлам.

Для перехода непосредственно к задаче трехмерного гравитационного моделирования необходимо обеспечить продолжение масс за боковые грани плотностного куба и выбрать закон распределения фоновой плотности (плотности относимости) «нормальной» модели. Послойная организация сеточных «грид-файлов» интерполированной плотности позволяет автоматизировать алгоритм требуемых вычислений. В качестве фоновой плотности принимается плотность «нормальной» модели, зависящая только от глубины. Ее можно получить, усредняя сеточные функции интерполированной плотности по каждому слою цифрового «куба». Такую плотность условно можно назвать гидростатической. Полученная закономерность изменения средней плотности с глубиной распространяется и на законтурное пространство. В этом случае вычисленное гравитационное поле «нормальной» модели (фоновое поле) будет постоянной величиной, а аномальная часть гравитационного поля всегда отнесена к нулевому уровню. Краевой эффект продолжения масс во внешность слоя равен амплитуде гравитационной ступени на границе образующего контура. Амплитуда гравитационной ступени пропорциональна разности между фактической плотностью внутри слоя и ее усредненным значением во внешней области. Чем меньше толщина слоя (шаг дискретизации по оси глубин), тем меньше величина краевых аномалий.

Как правило, знак этих аномалий меняется случайным образом при переходе от слоя к слою. Сумма по всем слоям дает статистически усредненную оценку минимального краевого эффекта.

На рис. 5 (цветная вкладка) приведены расчетные аномалии гравитационного поля в двумерном и трехмерном вариантах.

Предложенная организация входной количественной информации и трехмерная плотностная модель, построенная в виде послойного цифрового куба, допускают применение высокоэффективных автоматизированных алгоритмов решения прямых и обратных задач гравиметрии, не требующих вмешательства интерпретатора на этапе формализованных вычислений.

Заключение

Построение трехмерных плотностных моделей по профильным сейсмическим разрезам и заданным на площади аномалиям гравитационного поля составляют предмет гравитационного сейсмоплотностного моделирования. Предложена технология преобразования скоростных разрезов в двумерные плотностные матрицы. Разработан алгоритм трансформации двумерных часовых массивов в формат послойных сеточных функции трехмерного плотностного куба.

Результаты трехмерного моделирования по сеточной технологии позволили выделить ряд характерных особенностей в распределении взаимоувязанных плотностных и скоростных параметров в земной коре и верхней мантии в зоне сочленения Северного Урала и Тимано-Печорской плиты.

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта 12-И-5-2065 фундаментальных исследований УрО РАН.

Литература

Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Начапкин И.И., Бахвалов А.Н. Разработка методики объемного моделирования верхней части литосферы Урала // Уральский геофизический вестник. 2000а. № 1. С. 56–60.

Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Начапкин Н.И., Бахвалов А.И. Использование результатов геофизических исследований на региональных профилях для глубинного геокартирования // Разведка и охрана недр. 2000б. № 2. С. 2–6.

Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам // Глубинное строение территории СССР. М.: Наука, 1991. С. 118–135.

Красовский С.С. Гравитационное моделирование глубинных структур земной коры и изостазия. Киев: Наукова Думка, 1989. 246 с.

Костюченко С.Л., Романюк Т.В. О природе Мезенского гравитационного максимума // Физика Земли. 1997. № 12. С. 3–32.

Мартышко П.С., Ладовский И.В., Колмогорова В.В., Цидаев А.Г., Бызов Д.Д. Особенности построения плотностных моделей литосферы при условии изостатической уравновешенности // Международная конференция «Шестые научные чтения Ю.П. Булашевича». Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 251–254.

Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной обратной кинематической задачи для двумерных полей рефрагированных волн // Численные методы в сейсмических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1983. С. 140–152.

Новоселицкий В.М., Проворов В.М., Шилова А.А. Физические свойства пород осадочного чехла севера Урало-Поволжья. Свердловск: АН СССР, 1985. 132 с.

Цидаев А.Г. Опыт построения трехмерных плотностных моделей по сейсмическим данным // Двенадцатая Уральская молодежная научная школа по геофизике. Пермь, 2011. С. 280–283.

Цидаев А.Г., Фадеева Н.В., Бызов Д.Д. Об одном методе решения линейной обратной задачи гравиметрии // Международный научный семинар «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей им. Д.Г. Успенского». 38-я сессия. Пермь, 2011. С. 288–291.

Цирульский А.В., Никонова Ф.И., Федорова Н.В. Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений. Методические рекомендации. // Свердловск: ИГФ УНЦ АН СССР, 1980. 136 с.

К статье Мартышко П.С., Ладовского И.В., Колмогоровой В.В., Цидаева А.Г., Бызова Д.Д. – «Применение сеточных функций в задачах трехмерного плотностного моделирования»

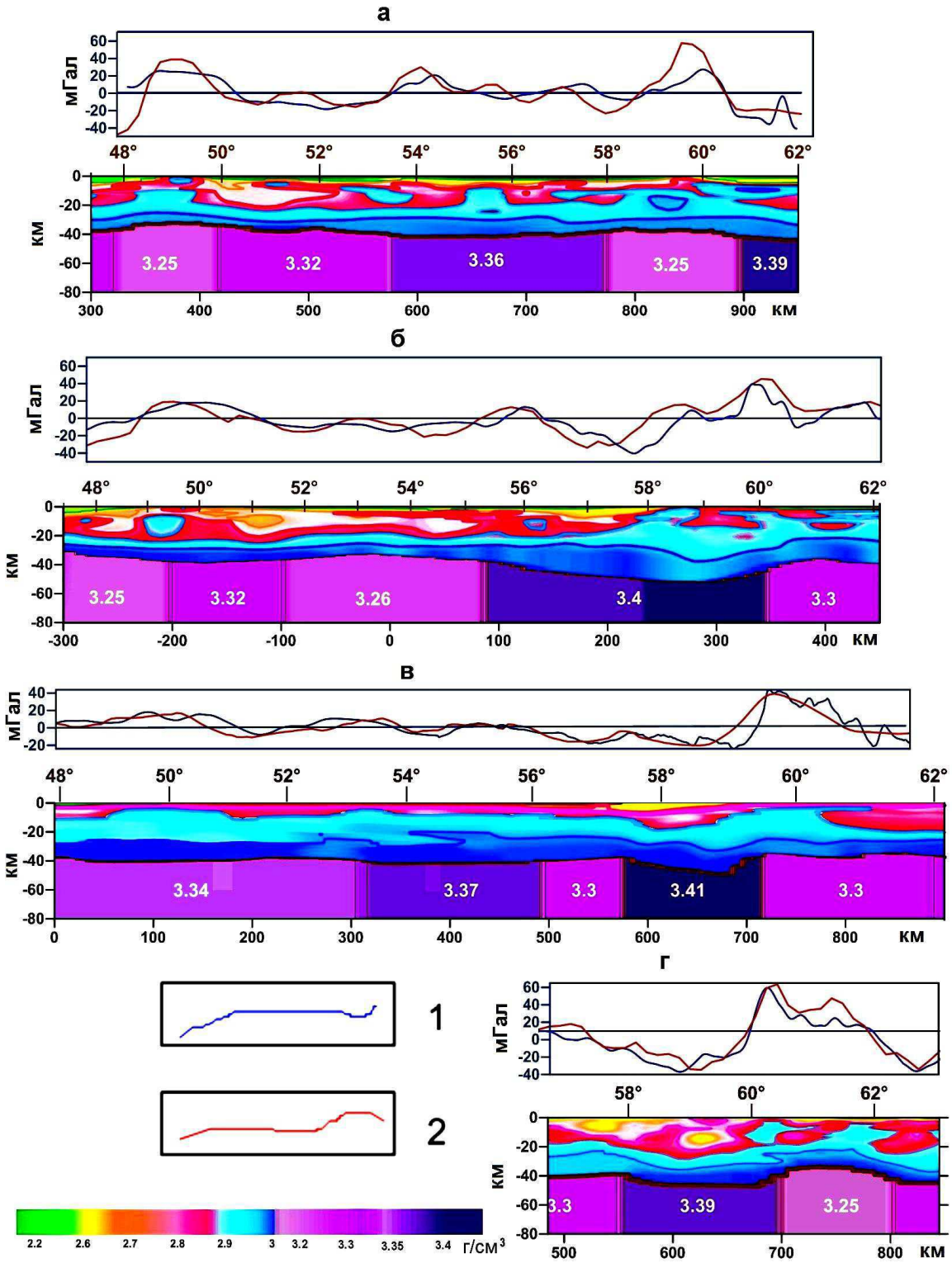

Рис. 1. Двумерные плотностные модели начального приближения строения земной коры и верхней мантии по фрагментам геотраверсов: Агат-2(а); Кварц(б); Рубин-1(в) и Краснолениинского профиля ГСЗ(г). Расчетное гравитационное поле моделей Δg до глубины 80 км (кривая 2) сопоставлено с наблюденными аномалиями Буге на уровне дневной поверхности (кривая 1)

К статье Мартышко П.С., Ладовского И.В., Колмогоровой В.В., Цидаева А.Г., Бызова Д.Д. – «Применение сеточных функции в задачах трехмерного плотностного моделирования»

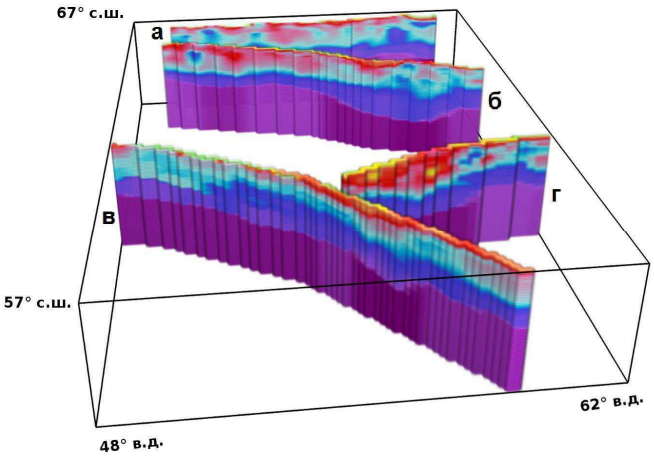

Рис. 2. Пространственное положение плотностных разрезов на цифровом планшете карты аномалий гравитационного поля в координатах 57–67° с.ш. и 48–62° в.д.: обозначение профилей см. рис. 1

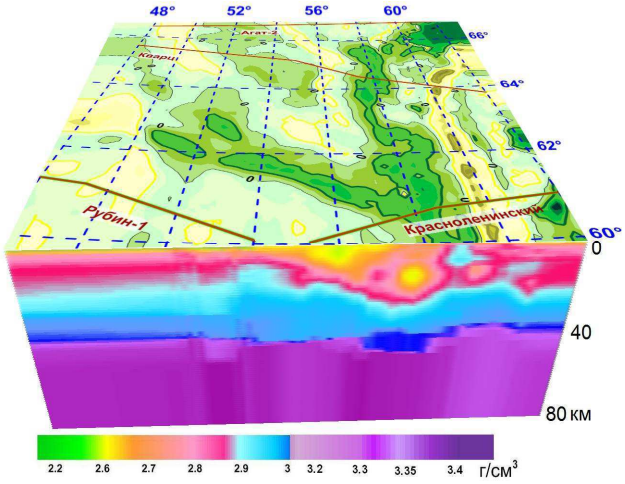

Рис. 3. Четырехмерный цифровой «куб» параметров (x, y, z, σ), построенный по интерполированному пакету сеточных функций на разноглубинных горизонтальных срезах; сверху наложен планшет схематического фрагмента карты аномалий гравитационного поля

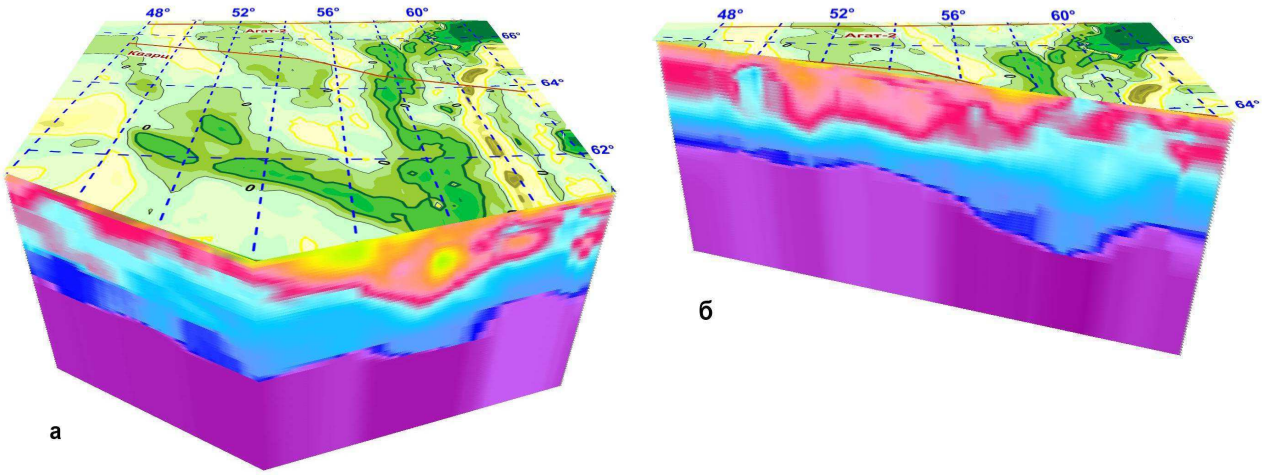

Рис. 4. Сечения цифрового куба по граничным «Surfer Bln»-файлам, задающим положение каждого конкретного профиля на исследуемой площади: а) сечение по профилям Рубин-1 и Красноленинский; б) сечение по профилю Кварц

К статье Мартышко П.С., Ладовского И.В., Колмогоровой В.В., Цидаева А.Г., Бызова Д.Д. – «Применение сеточных функций в задачах трехмерного плотностного моделирования»

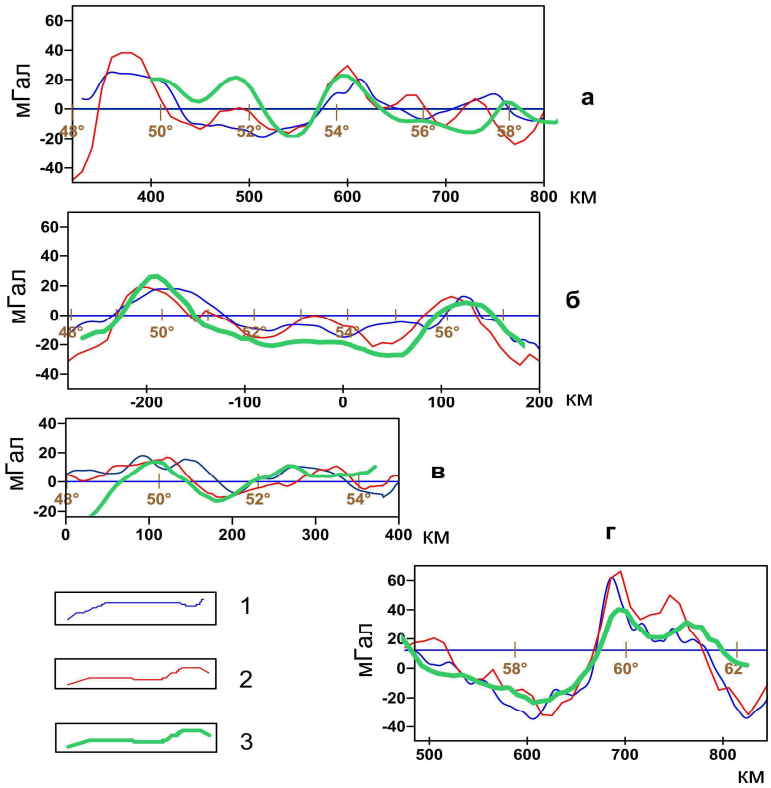

Рис. 5. Наблюденное гравитационное поле (кривая 1) и сопоставление расчетных аномалий поля Δ g по профилям для двумерной (кривая 2) и трехмерной (кривая 3) плотностной модели начального приближения; обозначение профилей см. рис. 1

К статье Федоровой Н.В., Носкевича В.В. – «Реконструкция планировки укрепленных поселений эпохи бронзы на Южном Урале (Ольгино и Коноплянка) по результатам ...»

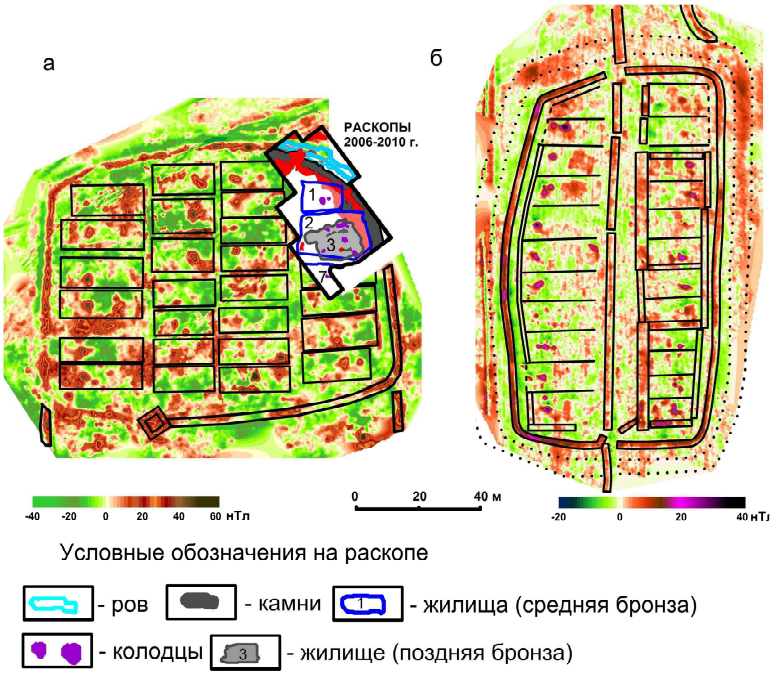

Рис. 3. Реконструкция внутренней структуры поселений по данным магнитной съемки: а) поселение Ольгино; б) поселение Коноплянка; условные обозначения: аномалии от оборонительной стены показаны двойной черной линией, от вала – точечным пунктиром; положение внутренних стен и контуры жилиц показаны черными линиями или прямоугольниками; 2, 7 – жилища