

УДК 550.3:004.02

МЕТОД ИНТЕРПОЛЯЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ ФРАГМЕНТАРНО ЗАДАННЫХ ДАННЫХ

¹Кобрунов А.И., ¹Мотрюк Е.Н., ²Ломинский Д.О.

¹ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»,

Ухта, e-mail: akobrunov@ugtu.net;

²ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа
имени И.М. Губкина», Москва

Необходимость построения объемной структурно-плотностной модели геологической среды, удовлетворяющей гравитационному полю, проявляется при проведении эффективного прогноза нефтегазоносности. Наличие для построения только фрагментарно заданных данных, в том числе профильных, приводит к задаче интегрирования их в объемную модель. В данной статье представлена разработка алгоритмов и вычислительных схем интерполяции профильных данных в объемные плотностные модели для случая сложно-построенных сред, применяемых при решении прямых и обратных задач гравиразведки. Подробно описаны способы восстановления объемной среды по системе профилей: односторонняя линейная интерполяция, «змейка», рекурсия, которые позволяют максимально учитывать априорную информацию о геолого-геофизических параметрах среды, а также описан алгоритм интегрирования профильных данных в объемную модель, разработанный для крупных плотностных структур типа седиментационных бассейнов.

Ключевые слова: гравиразведка, сложнопостроенные среды, прямые задачи гравиразведки, метод интерполяции границ, модель геологической среды

METHOD OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT INTERPOLATION IN A FRAGMENTED SET OF DATA

¹Kobrunov A.I., ¹Motryuk E.N., ²Lominskiy D.O.

¹FGBOU VPO «Ukhta State Technical University», Ukhta, e-mail: akobrunov@ugtu.net;

²FGBOU VPO «Russian State University of Oil and Gas named after Gubkin», Moscow

The need to develop a volumetric structural-density model of the geological environment, satisfying the gravitational field manifests itself in conducting effective forecast of oil and gas. Availability for building only partially specified data, including profile, leads to the problem of integrating them into a three-dimensional model. This paper presents the development of algorithms and computational schemes for the interpolation of data along the profile in the volume density models for the case of complex environments used in the solution of direct and inverse problems of gravity. It describes methods of restoring the volume of the geological environment of the system profiles, such as one-sided, «snake», recursion, which allow maximum consideration of a priori information about environment geological and geophysical parameters, as well as an algorithm for the integration of relevant data in a three-dimensional model developed for large-scale density structures.

Keywords: gravity prospecting, complex structure environment, direct gravity problem, method of boundaries interpolation, geological environment model

Для проведения эффективного прогноза нефтегазоносности необходимо построение объемной структурно-плотностной модели геологической среды, удовлетворяющей гравитационному полю. Однако для построения имеются только фрагментарно заданные данные, в том числе профильные. Построенные двумерные модели могут быть реконструированы решением структурной или плотностной обратных задач гравиразведки [1–5]. Для преобразования двумерных данных в трехмерные существует много прикладных программных средств (например, Surfer, Ко-скад 3D и др.), алгоритмов (послойной интерполяции, методы крайгинга и др.), выбор которых зависит от характера имеющихся данных. В данной работе представлена разработка алгоритмов и вычислительных схем интерполяции профильных данных в объем-

ные плотностные модели, основные положения которых изложены в [6, 7].

Исходные данные в условиях недоопределенности задаются системой профилей Γ , $\Gamma = \{\Gamma_l\}$, $l = 1, \dots, P$, в которую входит P геолого-геофизических разрезов. Систему координат рассматриваем с осью Oz , направленной вниз и плоскостью xOy – совмещенной с дневной поверхностью. Для всех разрезов также имеются координаты начала и конца в новой, общей системе координат. Для представления *структурной модели* по каждому профилю каждой точке x сопоставляется глубина залегания $z = f_k(x)$ соответствующей границы $k = 0, 1, \dots, N$, лежащей в области S , ограниченной горизонтальной полосой Π . Каждый из пластов характеризуется своим неизменным по вертикали параметром плотности $\sigma_k(x)$.

Необходимо по имеющимся данным построить объемную структурно-плотностную модель среды [1, 2, 3]. В ней каждой точке $s = \{x, y\}$ пространства V , ограниченного горизонтальной полосой Π , сопоставляется глубина залегания $z = f_k(s)$ соответствующей границы $k = 0, 1, \dots, N$. Каждый из пластов характеризуется своим параметром плотности $\sigma_k(s)$, неизменным по вертикали в пределах каждого из пластов (рис. 1). В этом случае модель представляет собой следующее:

- границы, ограничивающие пласты, представляют собой однозначные функции пространственных координат $z_k = f_k(s)$, $k = 0, 1, \dots, N + 1$;

- плотность пласта, заключенного между k -й и $k + 1$ -й границами, есть функция горизонтальных координат $\sigma_{k+1} = \sigma_{k+1}(s)$, $k = 0, 1, \dots, N$;

- нулевая граница есть горизонтальная пластина с глубиной f_0 и плотностью пласта σ_0 ;

- плотность среды ниже границы с номером N есть σ_{N+1} ;

- величины $f_0, \sigma_{N+1}, \sigma_0$ считаются постоянными;

- объемная модель $\{\bar{f}, \Delta\bar{\sigma}\}$ имеет след на поверхности $\{l\}$ – проходящей через линию Γ_1 нормально к дневной поверхности двумерную модель $\{\bar{f}, \Delta\bar{\sigma}\}\{l\}$.

Для объемной структурной модели введем краткое обозначение:

$$\{\bar{f}, \Delta\bar{\sigma}\}, \quad \bar{f} = \{f_0, f_1, \dots, f_N\},$$

$$\Delta\bar{\sigma} = \{\Delta\sigma_0, \Delta\sigma_1, \dots, \Delta\sigma_N\}, \quad \Delta\sigma_k = \sigma_k - \sigma_{k+1},$$

$$\sigma_0 = \sigma_{N+1} = 0.$$

Здесь $\Delta\sigma_k$ – контрастность k -го пласта.

Для построения объемной структурно-плотностной модели по системе профилей разработаны следующие алгоритмы интерполяции $Q(\Gamma)$: односторонняя линейная интерполяция, «змейка», рекурсия (прямоугольная). Алгоритм интерполяции системы $\{\bar{f}, \Delta\bar{\sigma}\}\{l\}$, заданной на профилях Γ в объемную модель $\{\bar{f}, \Delta\bar{\sigma}\}$ обозначим $Q(\Gamma)$:

$$\{\bar{f}, \Delta\bar{\sigma}\} = Q(\Gamma)(\{\bar{f}, \Delta\bar{\sigma}\}\{l\}).$$

Каждый алгоритм состоит из двух этапов:

Аппроксимация по профилям. По каждому профилю Γ_l находим значения глубин z_k^l и плотностей σ_k^l с заданным разбиением $step_r$. Координаты по горизонтали для каждой из границ $xx_i^l = xx_0^l + i \cdot step_r$, где $k = 0, \dots, N$ – номера границ, $l = 1, \dots, P$ – номера профилей, $i = 0, \dots, P_l$ – число точек,

получившихся при интерполяции на соответствующем профиле и xx_0^l – координаты начала профилей. Для приведения данных к системе координат производим поворот осей на угол α^l , образованный соответствующим профилем с осью Ox . Здесь значения x_d^l – координаты начала l -го профиля в новой системе координат (x_i^l, y_i^l) :

$$\begin{aligned} x_i^l &= xx_i^l \cdot \cos \alpha^l + x_d^l; \\ y_i^l &= xx_i^l \cdot \sin \alpha^l + y_d^l. \end{aligned} \quad (1)$$

Аппроксимация по площади. С целью оптимизации математических расчетов в качестве объекта выбирается прямая призма, представляющая собой совокупность структурно-плотностных разрезов по профилям. Для получения по рассматриваемой площади $G = \{(x_m^k, y_n^k), m = 0, \dots, K_x, k = 0, \dots, N, n = 0, \dots, K_y\}$ значений глубин залегания $f_k(G)$ и плотностей $\sigma_k(G)$ разбиения используем линейную интерполяцию данных по профилям. Размеры ячейки сетки Δx и Δy по осям Ox и Oy . Координаты призмы по осям меняются: от \dot{x}_1 до \dot{x}_2 по оси Ox , от \dot{y}_1 до \dot{y}_2 по оси Oy и от \dot{z}_1 до \dot{z}_2 по оси Oz (рис. 2).

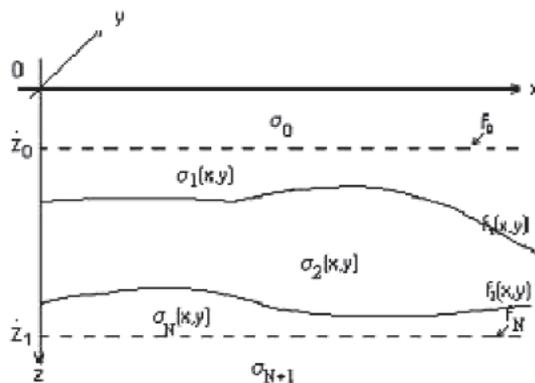


Рис. 1. Объемная структурно-плотностная модель среды

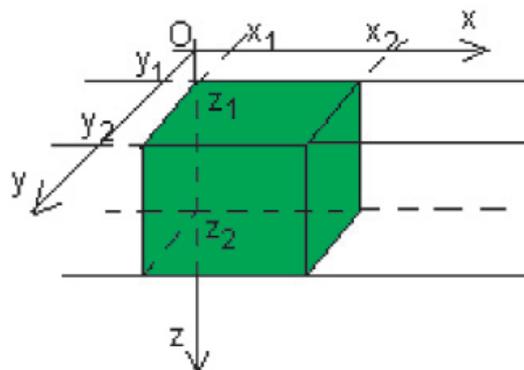


Рис. 2. Тестируемая модель

В основе интерполяции лежит метод сравнения трех ближайших к рассматриваемой (x_m^k, y_n^k) точек с известными глубинами и плотностями с последующей интерполяцией на сетку. Для каждой из границ последовательность действий одинакова, поэтому индекс k опустим.

Односторонняя интерполяция. Обход полученной сетки G для каждой границы производим слева направо. Последовательность действий представляет собой итерационную процедуру, которую опишем для произвольной точки (x_m, y_n) .

Шаг 1. Находим точку (x_{i1}^1, y_{i1}^1) на l профиле, имеющую минимальное расстояние до исследуемой:

$$d_{\min 1}(x_{i1}^1, y_{i1}^1) = \min_{i,l} \sqrt{(x_m - x_i^l)^2 + (y_n - y_i^l)^2}.$$

Здесь $i = 0, \dots, P_l$ – номер точки. Это точка вида 1. Если расстояние меньше половины диагонали ячейки построенной сетки, то

$$\sigma_k(x_m, y_n) = \sigma_k^1(x_{i1}^1, y_{i1}^1);$$

$$f_k(x_m, y_n) = z_k^1(x_{i1}^1, y_{i1}^1).$$

Шаг 2. Ищем по профилям ближайшую к исследуемой точку (x_{i2}^2, y_{i2}^2) , лежащую справа от (x_m, y_n) в полосе

$$\Gamma_1 = \left\{ (x, y) : x \in (x_m; \dot{x}_2), y \in \left[y_n - \frac{\Delta y}{2}; y_n + \frac{\Delta y}{2} \right] \right\}$$

и находящейся от нее на расстоянии

$$r_x(x_{i2}^2, y_{i2}^2) = \min_{i,l} \sqrt{(x_m - x_i^l)^2 + (y_n - y_i^l)^2}$$

(точка вида 2).

Шаг 3. Далее находим ближайшую по профилям к исследуемой точку (x_{i3}^3, y_{i3}^3) , лежащую в полосе

$$\Gamma_1 = \left\{ (x, y) : y \in (y_n; \dot{y}_2), x \in \left[x_m - \frac{\Delta x}{2}; x_m + \frac{\Delta x}{2} \right] \right\}$$

$$z(x_m, y_n) = z(x_{i3}^3, y_{i3}^3) + \frac{(y_n - y_{i3}^3)(z(x_m, y_{n-1}) - z(x_{i3}^3, y_{i3}^3))}{y_{n-1} - y_{i3}^3};$$

$$\sigma(x_m, y_n) = \sigma(x_{i3}^3, y_{i3}^3) + \frac{(y_n - y_{i3}^3)(\sigma(x_m, y_{n-1}) - \sigma(x_{i3}^3, y_{i3}^3))}{y_{n-1} - y_{i3}^3}. \quad (4)$$

3. Если $r_x < r_y$ или нет точек вида 3, то составляем уравнение прямой, проходящей через точки (x_{i2}^2, y_{i2}^2) и (x_{m-1}, y_n) (левую и вида 2):

$$z(x_m, y_n) = z(x_{i2}^2, y_{i2}^2) + \frac{(x_m - x_{i2}^2)(z(x_{m-1}, y_n) - z(x_{i2}^2, y_{i2}^2))}{x_{m-1} - x_{i2}^2};$$

(точка вида 3) и находящейся от нее на расстоянии

$$r_y(x_{i3}^3, y_{i3}^3) = \min_{i,l} \sqrt{(x_m - x_i^l)^2 + (y_n - y_i^l)^2}.$$

Схематично описанные выше виды точек интерполяции приведены на рис. 3.

Шаг 4. В случае граничных точек сетки используются особые способы нахождения значений глубин и плотностей:

1. В точках нижней границы сетки ($n = 0$) значениям глубин и плотностей модели присваиваем значения, принадлежащие точке первого вида (x_{i1}^1, y_{i1}^1) .

2. В точках левой границы сетки ($m = 0$) искомым величинам присваиваем среднее значение соседних нижних (x_0, y_{n-1}) и (x_1, y_{n-1}) точек:

$$z(x_0, y_n) = \frac{z(x_0, y_{n-1}) + z(x_1, y_{n-1})}{2};$$

$$\sigma(x_0, y_n) = \frac{\sigma(x_0, y_{n-1}) + \sigma(x_1, y_{n-1})}{2}. \quad (2)$$

3. В точках правой ($m = K_x$) и верхней ($n = K_y$) границ сетки искомым характеристикам присваиваем среднее значение соответствующих характеристик предыдущей (x_{m-1}, y_n) и нижней (x_m, y_{n-1}) точек:

$$z(x_m, y_n) = \frac{z(x_{m-1}, y_n) + z(x_m, y_{n-1})}{2};$$

$$\sigma(x_m, y_n) = \frac{\sigma(x_{m-1}, y_n) + \sigma(x_m, y_{n-1})}{2}. \quad (3)$$

Шаг 5. После нахождения точек приступаем к сравнению расстояний от них до исследуемой точки:

1. Если нет точек вида 2 и вида 3, то используем формулы (3).

2. Если $r_x \geq r_y$ или нет точек 2 вида, то составляем уравнение прямой, проходящей через точки (x_{i3}^3, y_{i3}^3) и (x_m, y_{n-1}) . В результате получаем

$$z(x_m, y_n) = z(x_{i3}^3, y_{i3}^3) + \frac{(y_n - y_{i3}^3)(z(x_m, y_{n-1}) - z(x_{i3}^3, y_{i3}^3))}{y_{n-1} - y_{i3}^3};$$

$$\sigma(x_m, y_n) = \sigma(x_{i3}^3, y_{i3}^3) + \frac{(y_n - y_{i3}^3)(\sigma(x_m, y_{n-1}) - \sigma(x_{i3}^3, y_{i3}^3))}{y_{n-1} - y_{i3}^3}. \quad (4)$$

3. Если $r_x < r_y$ или нет точек вида 3, то составляем уравнение прямой, проходящей через точки (x_{i2}^2, y_{i2}^2) и (x_{m-1}, y_n) (левую и вида 2):

$$z(x_m, y_n) = z(x_{i2}^2, y_{i2}^2) + \frac{(x_m - x_{i2}^2)(z(x_{m-1}, y_n) - z(x_{i2}^2, y_{i2}^2))}{x_{m-1} - x_{i2}^2};$$

$$\sigma(x_m, y_n) = \sigma(x_{i2}^{i2}, y_{i2}^{i2}) + \frac{(x_m - x_{i2}^{i2})(\sigma(x_{m-1}, y_n) - \sigma(x_{i2}^{i2}, y_{i2}^{i2}))}{x_{m-1} - x_{i2}^{i2}}. \quad (5)$$

Шаг 6. Выбрав удовлетворяющие имеющимся данным уравнения, находим интересующие нас величины для точки (x_m, y_n) и переходим к шагу 1, где находим плотность и глубину залегания точки $z(x_{m+1}, y_n)$ или $z(x_0, y_{n+1})$, если $m = K_x$.

«Змейка». Данная интерполяция отличается от предыдущей направлением обхода узлов сетки G, т.е. порядком заполнения данных точек (x_m, y_n) .

1. В четном горизонтальном ряду ($n = 0, 2, \dots$) движемся слева направо и заполняем узлы сетки, как в предыдущей интерполяции.

2. В нечетном горизонтальном ряду ($n = 1, 3, \dots$) движемся справа налево.

Существуют следующие отличия от алгоритма предыдущей интерполяции:

Шаг 2. Вместо точки вида 2 находим точку вида 4 в полосе слева:

$$\Gamma_2 = \left\{ (x, y) : x \in (x_1; x_m), y \in \left[y_n - \frac{\Delta y}{2}; y_n + \frac{\Delta y}{2} \right] \right\}$$

и находящейся от нее на расстоянии

$$r_x(x_{i4}^{i4}, y_{i4}^{i4}) = \min_{i,l} \sqrt{(x_m - x_i^l)^2 + (y_n - y_i^l)^2}.$$

Вместо (5) составляем уравнение прямой, проходящей через точки $(x_{i4}^{i4}, y_{i4}^{i4})$ и (x_{m+1}, y_n) :

$$z(x_m, y_n) = z(x_{i4}^{i4}, y_{i4}^{i4}) + \frac{(x_m - x_{i4}^{i4})(z(x_{m+1}, y_n) - z(x_{i4}^{i4}, y_{i4}^{i4}))}{x_{m+1} - x_{i4}^{i4}};$$

$$\sigma(x_m, y_n) = \sigma(x_{i4}^{i4}, y_{i4}^{i4}) + \frac{(x_m - x_{i2}^{i2})(\sigma(x_{m-1}, y_n) - \sigma(x_{i4}^{i4}, y_{i4}^{i4}))}{x_{m+1} - x_{i2}^{i2}}. \quad (6)$$

Шаг 4

1. В граничных точках слева ($m = 0$) искомым величинам присваиваем среднее значение правой (x_1, y_n) и нижней (x_0, y_{n-1}) точек:

$$z(x_0, y_n) = \frac{z(x_0, y_{n-1}) + z(x_1, y_n)}{2}; \quad \sigma(x_0, y_n) = \frac{\sigma(x_0, y_{n-1}) + \sigma(x_1, y_n)}{2}. \quad (7)$$

2. В граничных точках справа ($m = K_x$) глубины и плотности находим следующим образом: берем среднее значение нижней (x_{K_x}, y_n) и нижней предыдущей (x_{K_x}, y_{n-1}) :

$$z(x_m, y_n) = \frac{z(x_{K_x}, y_n) + z(x_{K_x}, y_{n-1})}{2}; \quad \sigma(x_m, y_n) = \frac{\sigma(x_{K_x}, y_n) + \sigma(x_{K_x}, y_{n-1})}{2}. \quad (8)$$

Шаг 5.

1. Если нет точек вида 4 и 3, то искомым характеристикам присваиваем среднее правого (x_{m+1}, y_n) и нижнего (x_m, y_{n-1}) значений в найденных ранее узлах

$$z(x_m, y_n) = \frac{z(x_{m+1}, y_n) + z(x_m, y_{n-1})}{2}; \quad \sigma(x_m, y_n) = \frac{\sigma(x_{m+1}, y_n) + \sigma(x_m, y_{n-1})}{2}. \quad (9)$$

Прямоугольная (Рекурсия). Обход начинается с центра сетки и продолжается против часовой стрелки вокруг этой центральной точки. Возможны 4 варианта нулевого элемента (рис. 4):

- одна точка;
- вертикальный ряд точек;
- горизонтальный ряд точек;
- набор точек, образующий квадрат.

Рассмотрим порядок действий алгоритма для каждого элемента.

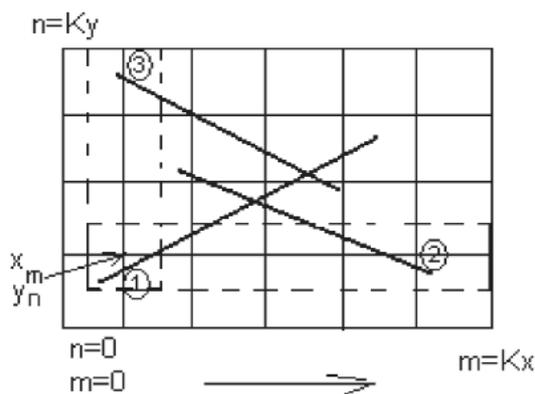


Рис. 3. Виды точек сетки односторонней интерполяции

а) Ищем точку вида 1 и искомым значения присваиваем ее характеристики.

б) Двигаемся снизу вверх. Первую точку заполняем, как в (а). Для остальных точек добавляем сравнение с ближайшей точкой в вертикальной полосе сверху, с мощностью Δy (точка вида 3).

в) Двигаемся слева направо. Первую точку заполняем, как в (а). В остальных добавляем сравнение с ближайшей точкой в горизонтальной полосе справа, с мощностью Δx (точка вида 2).

г) Движение производим по кругу. Первую точку заполняем, как в (а). Вторую, как в (в). Третью, как в (б). При работе с последней точкой добавляем сравнение с ближай-

шей точкой в вертикальной полосе сверху, с мощностью Δy (точка вида 3) и с ближайшей в горизонтальной полосе слева, с мощностью Δx (точка вида 4).

Таким образом, выше полностью описан алгоритм $Q(\Gamma)$ интегрирования профильных данных в объемную модель $\{\vec{f}, \Delta \vec{\sigma}\}$, разработанный для крупных плотностных структур типа седиментационных бассейнов. В настоящее время ведется проверка алгоритмов на устойчивость, выработка рекомендаций по выбору шага и типа интерполяции.

Список литературы

1. Аминов Л.З., Кобрунов А.И., Моисеенкова С.В., Мотрюк Е.Н., Шилова С.В., Мужикова А.В. Методика интегрированной интерпретации гравиметрических данных в условиях слабой изученности с целью построения объемных региональных плотностных моделей седиментационных бассейнов // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-востока России: материалы XIV геологического съезда Республики Коми. Т/ IV. – Сыктывкар: Геопринт, 2004. – С. 79–81.

2. Кобрунов А.И. Алгоритм учёта влияния вмещающей среды при инверсии гравиметрических данных / А.И. Кобрунов, М.И. Барабанов // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – № 1 (17). – С. 84–88.

3. Кобрунов А.И. Математические методы моделирования в прикладной геофизике (избранные главы) в 2-х ч. Ч.1 Функционально-аналитические основы // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 11. ISSN – 199-3947. 78с. Ч.2 Системный анализ и моделирование в условиях неопределенности. – Ухта, УГТУ, 2014. – 154 с.

4. Кобрунов А.И., Петровский А.П., Даниленко А.Н., Моисеенкова С.В., Аминов Л.З. Теория и методы количественной комплексной интерпретации геофизических данных // Актуальные научно-технические проблемы развития геолого-геофизических промысловых и поисково-разведочных работ в Республике Коми. Книга 1. – Ухта, 2001. – С. 261–316.

5. Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных: учеб. пособие. – Ухта: УГТУ, 2007. – 286 с.: ил.

6. Мотрюк Е.Н., Мужикова А.В. Объемное структурно-плотностное моделирование геологической среды методом односторонней интерполяции на примере тел простейшей формы // Севергеоэкотех – 2003: материалы IV Межрегиональной молодежной научной конференции. – Ухта, УГТУ, 2003. – С. 554–556.

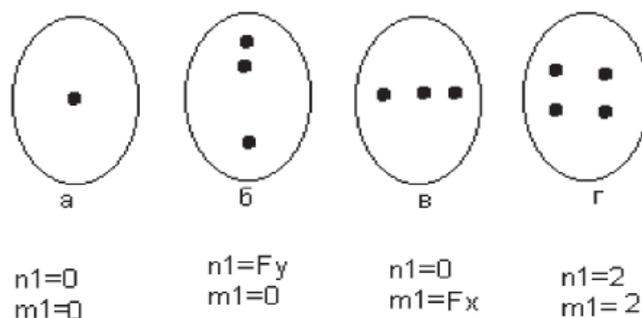


Рис. 4. Виды точек, характерных для интерполяции «рекурсия»

7. Мотрюк Е.Н., Мужикова А.В., Шилова С.В. Методика выбора аппроксимации для решения прямой задачи гравиразведки // Севергеоэкотех – 2002: тезисы докладов Межрегиональная молодежная научная конференция. – Ухта, 2002. – С. 31–32.

References

1. Aminov L.Z., Kobrunov A.I., Moiseenkova S.V., Motrjuk E.N., Shilova S.V., Muzhikova A.V. Metodika integrirovannoj interpretacii gravimetricheskikh dannyh v usloviyah slaboj izuchennosti s celju postroenija ob#emnyh regionalnyh plotnostnyh modelej sedimentacionnyh bassejnov // Geologija i mineralnye resursy Evropejskogo Severo-vostoka Rossii: materialy XIV geologicheskogo sezda Respubliki Komi. T/ IV. Syktyvkar: Geoprint, 2004. pp. 79–81.

2. Kobrunov A.I. Algoritm uchjota vlijanija vmeshhajushhej sredy pri inverzii gravimetricheskikh dannyh A.I. Kobrunov, M.I. Barabanov // Izvestija Komi NC UrO RAN. 2014. no. 1 (17). pp. 84–88.

3. Kobrunov A.I. Matematicheskie metody modelirovanija v prikladnoj geofizike (izbrannye glavy) v 2-h ch. Ch.1 Funkcionalno-analiticheskie osnovy // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimentalnogo obrazovanija. 2014. no. 11. ISSN 199-3947. 78s. Ch.2 Sistemnyj analiz i modelirovanie v usloviyah neopredelennosti. Uhta, UGTU, 2014. 154 p.

4. Kobrunov A.I., Petrovskij A.P., Danilenko A.N., Moiseenkova S.V., Aminov L.Z. Teorija i metody kolichestvennoj kompleksnoj interpretacii geofizicheskikh dannyh // Aktualnye

nauchno-tehnicheskie problemy razvitija geologo-geofizicheskikh promyslovyh i poiskovo-razvedochnyh rabot v Respublike Komi. Kniga 1. Uhta, 2001. pp. 261–316.

5. Kobrunov A.I. Matematicheskie osnovy teorii interpretacii geofizicheskikh dannyh: ucheb. posobie. Uhta: UGTU, 2007. 286 p.: il.

6. Motrjuk E.N., Muzhikova A.V. Ob#emnoe strukturno-plotnostnoe modelirovanie geologicheskoy sredy metodom odносторонней interpoljacii na primere tel prostejšej formy // Severgeojekoteh 2003: materialy IV Mezhhregionalnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii. Uhta, UGTU, 2003. pp. 554–556.

7. Motrjuk E.N., Muzhikova A.V., Shilova S.V. Metodika vybora approksimacii dlja reshenija prjamoj zadachi gravirazvedki // Severgeojekoteh 2002: tezisy dokladov Mezhhregionalnaja molodezhnaja nauchnaja konferencija. Uhta, 2002. pp. 31–32.

Рецензенты:

Бурмистрова О.Н., д.т.н., заведующий кафедрой технологии и машин лесозаготовок, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта;

Андронов И.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.