

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ МЕТОДОМ POLUS

Г.В. Простолупов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассмотрены моменты развития метода Polus для улучшения его разрешающей способности при решении обратной задачи гравиметрии. Изучено влияние региональных помех на возможности локализации источников полюсами разных порядков: наиболее устойчивы к влиянию фоновых помех полюсы второго P_{II} и третьего P_{III} порядков. Разработана технология определения избыточной плотности источников через расчет среднеарифметических масс множества полюсов P_I , P_{II} , P_{III} по формулам для материального стержня в двумерном варианте и для шара – в трехмерном. Описана схема обнаружения области разуплотнения полярным методом при наземно-подземной гравиметрической съемке в подработанной толще.

Ключевые слова: гравиметрическая съемка, аномалия, вектор, полюс, обратная задача, интерпретация гравитационного поля.

К количественным параметрам источника при решении обратной задачи гравиметрии относятся: координаты расположения источника, здесь ключевую роль играет глубина залегания источника h ; размеры источника (или объем V) и его плотность σ (масса m). Надо отметить, что определение последних параметров невозможно без априорных знаний либо о плотности σ объекта (чтобы вычислить его объем V) или наоборот – об объеме V (чтобы найти его плотность σ). Последние два параметра связаны через массу этого источника $m = V\sigma$.

При развитии векторного метода Polus [1] на начальном этапе полюсы первого порядка P_I рассматривались как основные для локализации источников. Действительно, векторы, ортогональные поверхности потенциала V , их формирующие, прямо направлены в сторону изометричного источника [2]. Однако было замечено, что в сложных условиях формирования поля, например, при заглаблении источников модели или добавлении константы поля Δg , разброс полюсов P_I относительно изометричного источника становился очень значительным. Это свойство полюсов в случаях сложных полей рассматривалось как препятствие к применению и недостаток при интерпретации аномалий.

Дальнейшие исследования привели к использованию в качестве содержательной интерпретационной единицы, т. е. точки пересечения векторов, не только градиента потенциала – значение первой производной P_I , но также и второй P_{II} и третьей производной P_{III} .

При проведении модельных исследований полюсов второго P_{II} и третьего порядков P_{III} была замечена не только их способность к локализации более глубоких и близкорасположенных источников, но и устойчивость к изменению фоновой составляющей исходного поля Δg [3].

В связи с этим проведены следующие исследования. Рассмотрена модель из 5 источников, расположенных на глубине 200 м и создающих аномальное поле амплитудой 1 мГал. Горизонтальное расстояние между источниками изменяется от 1 км до 300 м. Разное горизонтальное расстояние взято для изучения разделительной способности метода для близкорасположенных источников. Полюсы всех трех порядков локализовались точно в районе источников.

Далее к полю прибавлялась константа 0.5 мГал, 1 и 2 мГал. Уже при константе 0.5 мГал полюсы первого P_I^{++} порядка сошли с глубины расположения источников 200 м и локализовались глубже на 100-700 м (рис. 1). При большей константе уход полюсов

первого порядка получился еще более значительным. Полюсы же второго P_{II}^{++} и третьего порядка P_{III}^{++} локализовались точно в районе источников.

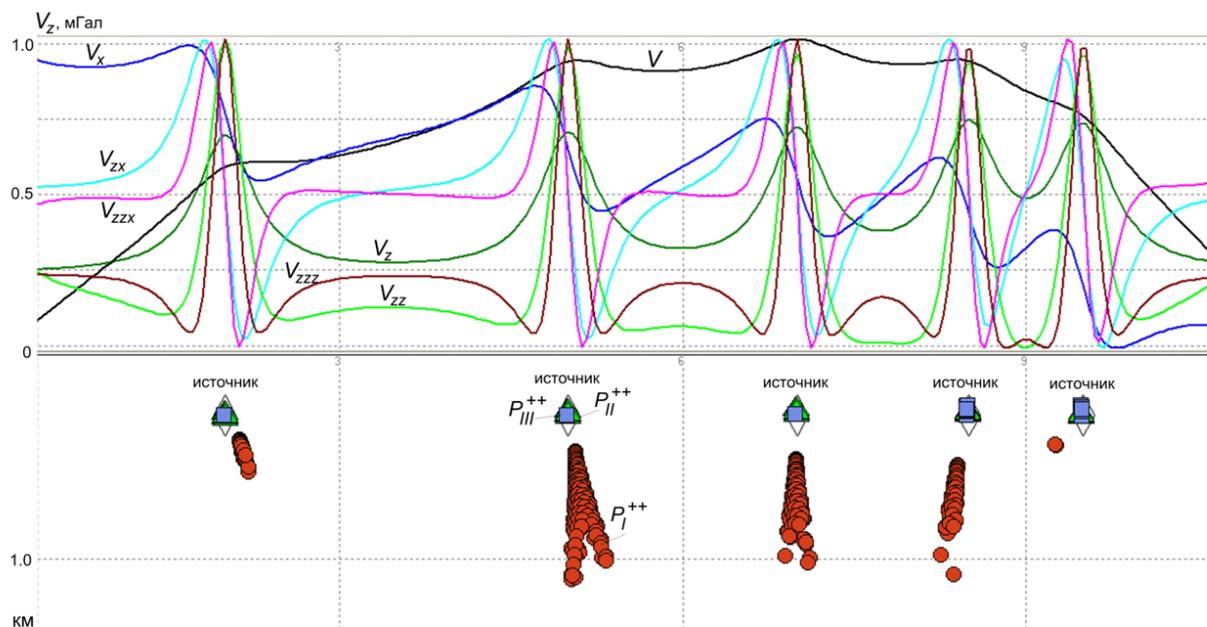


Рис. 1. Модель гравитационного влияния пяти источников и распределение полюсов первого, второго и третьего порядков определенных положительных P_I^{++} , P_{II}^{++} и P_{III}^{++} при сдвиге Δg на $+0.5$ мГал

Таким образом, локализация полюсов P_{II}^{--} , P_{II}^{++} , P_{III}^{--} , P_{III}^{++} относительно источников является нечувствительной к фоновым колебаниям. Причина этого заключается в достаточно узком диапазоне допустимых к расчету векторов – с незначительным отклонением от вертикали (не более 15° , что также приводит и к уменьшению линейной базы S угловой засечки для каждой пары векторов), – тогда именно верхняя часть графика – область перегиба – является определяющей. Как показали расчеты на моделях, этой части вполне достаточно, чтобы надежно рассчитать пространственные параметры источника, что является положительным моментом, т. к. при суперпозиции источников, именно пиковые значения поля, расположенные над источниками, оказываются наименее искаженным и более «приметными» в поле. Этот вывод является значимым, так как повышает возможности интерпретации наблюдаемого гравитационного поля, что было проверено на примере локализации источников сложного гравитационного поля [3].

Фоновые помехи, которые являются непредсказуемыми в реальных полях, к сожалению не позволяют использовать полюсы первого порядка P_I^{++} , P_I^{--} в практической интерпретации. Их реализация возможна только при наличии аномального поля, очищенного от региональных помех.

Полярный метод, как было описано ранее, позволяет с некоторой точностью найти местоположение источника в пространстве, т. е. его координаты, а также массу m источников. Каждый полюс является отдельным источником и «обладает» массой, которую можно определить по формуле Ньютона. Т. к. каждый полюс первого порядка P_I является в двумерном варианте, по сути, сечением материального стержня, перпендикулярного к плоскости рассмотрения или точечным источником (в трехмерном), то каждому полюсу можно присвоить массу m_{P_i} для двумерного и трехмерного случая соответственно по формулам:

$$m_{P_I} = \frac{V_z(x^2 + \zeta^2)}{2G\zeta} \text{ и } m_{P_I} = \frac{V_z(x^2 + \zeta^2)^{3/2}}{G\zeta}. \quad (1)$$

Как оказалось, и экспериментальные данные, полученные в программе Polus2D, это подтвердили, нет препятствий и для вычисления массы полюсов более высоких порядков P_{II} и P_{III} через вертикальные компоненты V_{zz} и V_{zzz} полного вектора ∇V_z и ∇V_{zz} , соответственно, по формулам для материального стержня, для двумерного случая:

$$m_{P_{II}} = \frac{V_{zz}(x^2 + \zeta^2)^2}{2G(\zeta^2 - x^2)} \text{ и } m_{P_{III}} = \frac{V_{zzz}(x^2 + \zeta^2)^3}{4G\zeta(\zeta^2 - 3x^2)}. \quad (2)$$

И для шара в трехмерном варианте:

$$m_{P_{II}} = \frac{V_{zz}(x^2 + \zeta^2)^{5/2}}{G(2\zeta^2 - x^2)} \text{ и } m_{P_{III}} = \frac{V_{zzz}(x^2 + \zeta^2)^{7/2}}{3G\zeta(2\zeta^2 - 3x^2)}. \quad (3)$$

В формулах (1-3): V_z, V_{zz}, V_{zzz} – вертикальные составляющие градиентов $\nabla V, \nabla V_z, \nabla V_{zz}$, определенные с помощью метода истокообразной аппроксимации поля [4]; G – гравитационная постоянная; x – горизонтальные и ζ – вертикальные расстояния от точки начала вектора до полюса первого P_I , второго P_{II} или третьего порядка P_{III} , соответственно.

Для каждого полюса определяются массы точки пересечений двух пар векторов в двумерном случае, и от 2 до 6 пар векторов в трехмерном случае. Полюсу присваивается среднеарифметическое значение масс. Соответствующие изменения по расчету масс полюсов внесены в программы Polus2D и Polus3D.

Таким образом, в случае заведомо известной конфигурации изучаемого объекта появилась возможность прямого расчета его избыточной плотности.

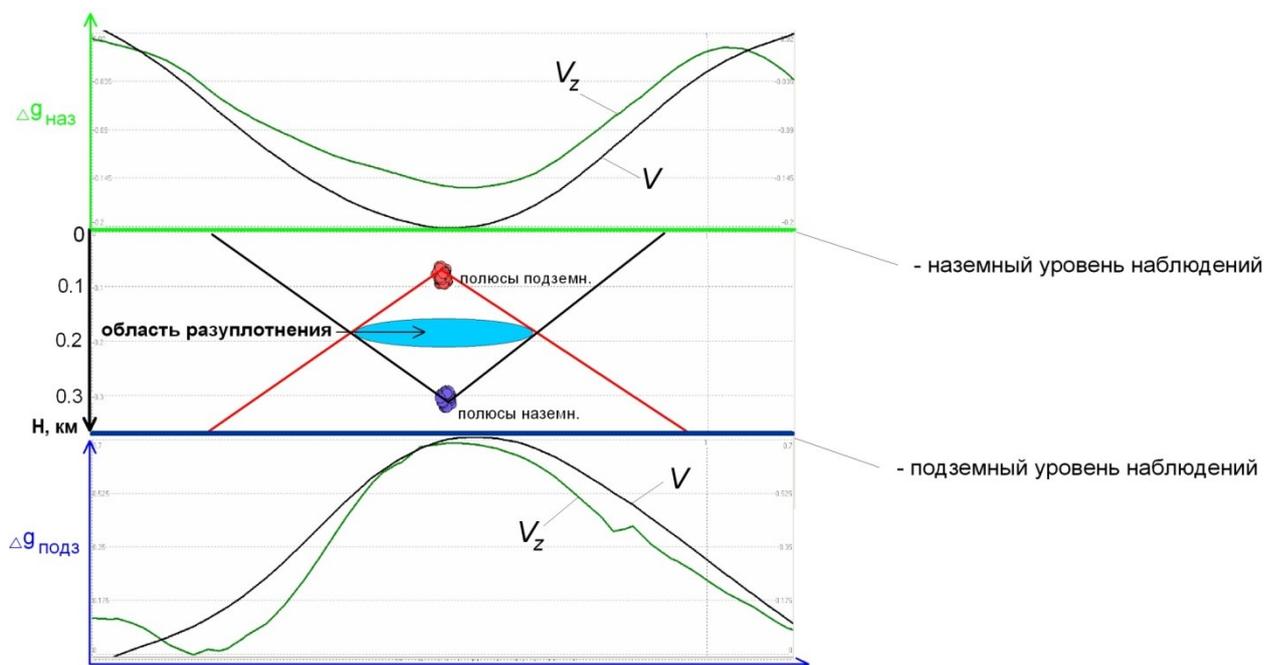


Рис. 2. Схема локализации и определения размеров горизонтальных размеров источника аномалий (разуплотнения) подработанной толщи при наземно-подземной съемке в системе Polus

Полевые гравиметрические работы лаборатории геопотенциальных полей помимо чисто наземных съемок включают и наземно-подземные съемки на рудниках ВКМКС [5].

Рассмотрим схему обнаружения координат области разуплотнения при наземно-подземной гравиметрической съемке с помощью полярного метода и моменты разделения источников [6]. На рис. 2 показано поле в редукции Буге, измеренное на поверхности $\Delta g_{\text{наз}}$ и на подземном уровне $\Delta g_{\text{подз}}$.

Как известно, преимущественно в слоистой среде эквивалентные источники, располагаются на разной глубине, при этом самый глубокий является источником точечный. Ближе к поверхности горизонтальные размеры источников увеличиваются, образуя конус эквивалентности. Все полюсы являются источниками точечными, характеризующими предельно возможную глубину эквивалентного распределения. Таким образом, в предположении квазислоистой среды можно прочертить конусы в нижнее полупространство с поверхности и в верхнее полупространство с уровня подземных наблюдений. По пересечениям конусов оцениваются горизонтальные размеры и глубина источника плотностной аномалии подработанной толщи. При этом контролем разделения аномалий выше уровня подземных наблюдений или ниже уровня, что имеет место для подземных съемок [7], может послужить определение средней массы полюсов наземного и подземного полей и их сравнение. Совпадения масс, определенных по методу Polus, аномальных полей двух уровней является подтверждением их принадлежности одному источнику, расположенному в подработанной толще.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-45-590011p_a

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полярная трансформация гравиметрических данных «Polus2d»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2017610475 / Тарантин М.В., Простолупов Г.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН. – 2016662317; заявл. 14.11.2016; зарегистрировано 11.01.2017; опублик. 11.01.2017. – 1 с.
2. Простолупов Г.В., Тарантин М.В. Полярная трансформация производных гравитационного потенциала // Геофизика. – 2013. – № 2. – С. 13-18.
3. Prostolupov G., Tarantin M. Features of Localization of the Poles of the Gravity Potential Regarding to the Field Sources and the Practical Implementation of the “Polus” Method // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields: 45th Uspensky International Geophysical Seminar. – Kazan, 2019. – P. 127-132. – (Book series: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9_14.
4. Долгаль А.С. Аппроксимация геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач // Геофизический журнал. – 1999. – Т. 21, № 4. – С. 71-80.
5. Бычков С.Г. Прикладные задачи гравиметрии при обеспечении безопасности отработки месторождения растворимых солей / С.Г. Бычков, Г.В. Простолупов, Г.П. Щербинина // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 4-12.
6. Новоселицкий В.М., Маргулис А.С. К обоснованию наземно-подземной гравиметрии. – Докл. АН УССР. – 1991. – № 8. – С. 115-118.
7. Новоселицкий В.М., Пенская М.Я. Новоселицкий В.М. О разделении полей в наземно-подземной гравиметрии // Горная геофизика: VI Междунар. семинар: тез. докл. / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 1993. – С. 47-48.