

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.8.013 : 551.25

В.И. ГУНИН

СТАНОВЛЕНИЕ ИНТРУЗИВА КАК ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ
ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ
И ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР (ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

С помощью численного моделирования показан механизм формирования условий для образования кольцевых и вихревых структур в районе становления интрузива, заключающийся в цепочке взаимозависимых событий по формированию гидродинамической зональности, а затем и петролого-геохимической. Последняя и становится основой для образования вихревых и кольцевых структур за счет тектонических движений, выветривания и денудации преобразованных флюидом пород.

Вихревые и кольцевые структуры довольно широко распространены в земной коре, что подтвердило дешифрирование космических снимков в конце XX в. Размеры таких структур варьируют от нескольких до нескольких сотен километров [1]. Считается, что подобные структуры контролируют крупные месторождения металлов и других полезных ископаемых [2, 5].

Вихревые — структуры, в которых существенную роль играют спиралевидные, дугообразные и эксцентричные кольцевые формы. В таких структурах всегда присутствуют две морфологически различные части: меньшая — внутренняя, и большая — внешняя. Внутренняя часть, часто округлой формы, не более 1/5, а нередко меньше 1/10 всей площади структуры, может располагаться как в центре, так и эксцентрично. Внешняя часть структур очерчена спиралевидными (вихревыми) или полукольцевыми (дуговыми) формами различной кривизны, которые обязательно сходятся к центру внутренней изометричной части. Как правило, подобные структуры прослеживаются и на глубину, в этом случае их называют «винтовыми структурами» [1].

Генезис вихревых и кольцевых структур остается пока дискуссионным. Существует множество гипотез образования: от вращательно-поступательного внедрения магмы до космического, ударно-метеоритного. Многие связывают образование структур с вращательными движениями блоков земной коры в горизонтальном направлении [1, 2].

В большинстве случаев в центре или в пределах данных структур фиксируются интрузивные тела,

которые скорее всего и являются причиной образования вихревых, кольцевых и винтовых структур, но условия их образования пока дискуссионны [1, 3, 5]. Возможно, что при остывании магматического очага за счет градиента температуры формируются конвективные потоки флюида во вмещающих породах, образующие циркуляционные ячейки, постепенно захватывающие и закристаллизованный интрузив. Такой процесс продолжается несколько сотен тысяч лет до исчезновения температурного градиента. При взаимодействии флюида с породами происходят гидротермально-метасоматические преобразования, ведущие к изменению физических и химических свойств пород, что впоследствии в условиях тектонических воздействий и денудации приводит к возникновению подобных структур.

Постановка задачи

Для проверки предположения о влиянии становления интрузива на причину образования данных структур и выяснения механизма формирования необходимых для этого условий проведен численный эксперимент с помощью трехмерной математической модели теплопереноса в пористых средах, которая в терминах функции тока, давления, температуры и концентрации выглядит так:

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial \psi_1}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial \psi_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial \psi_1}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \psi_1}{\partial z} \right) = \frac{\partial p_1}{\partial x} + f_1(t, x, y, z); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \psi_2}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \right) = \frac{\partial p_2}{\partial y} + f_2(t, x, y, z); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \psi_3}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial \psi_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial \psi_3}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial \psi_3}{\partial y} \right) + \frac{\partial \psi_3}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \psi_3}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho_\phi}{\partial z} + f_3(t, x, y, z); \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} \left(\kappa_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial P}{\partial y} \left(\kappa_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial P}{\partial z} \left(\kappa_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) = f_4(t, x, y, z); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial x} \left(\alpha_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(\alpha_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(\alpha_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + f_5(t, x, y, z); \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V_x \frac{\partial C_i}{\partial x} + V_y \frac{\partial C_i}{\partial y} + V_z \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial C_i}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial C_i}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial C_i}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - F_i(t, x, y, z); \quad (6)$$

$$V_x = \frac{\partial \psi_3}{\partial y} - \frac{\partial \psi_2}{\partial z} - \kappa_x \frac{\partial P}{\partial x}; \quad V_y = \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x} - \kappa_y \frac{\partial P}{\partial y}; \quad V_z = \frac{\partial \psi_2}{\partial x} - \frac{\partial \psi_1}{\partial y} - \kappa_z \frac{\partial P}{\partial z}; \quad (7)$$

$$\rho_\phi = \rho_0 - \rho_0 \beta (T - T_0) + \rho_0 \beta' (C_S - C_{S0}) + \rho_0 \beta' (P - P_0), \quad C_S = \sum C_i; \quad (8)$$

где $\psi_{1,2,3}$ — проекции вектора функции тока на координатные оси; T — температура; P — давление; C_i — концентрация i -го компонента в жидкости, $i=1, \dots, m$, m — количество элементов; t — время; x, y, z — пространственные координаты; $V_x, V_y, V_z, W_x, W_y, W_z, K_x, K_y, K_z, A_x, A_y, A_z, D_x, D_y, D_z, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ — проекции векторов скоростей фильтрации, тепловой волны, коэффициентов фильтрации, гидродинамического сопротивления, гидродисперсии, температуропроводности на координатные оси; β — термический коэффициент объемного расширения флюида; β' — средний концентрационный коэффициент объемного расширения флюида; β'' — коэффициент сжимаемости флюида; ρ_ϕ — плотность флюида; T_0, C_0 — фоновые температура и концентрация; P_0 — гидростатическое давление или напор; D — обобщенный коэффициент дисперсии, или коэффициент гидродисперсии; F_i — обобщенная функция кинетики превращения веществ; $f_i(t, x, y, z)$ — функция источника, $i=1, 5$.

Для решения системы уравнений задаются граничные и начальные условия:

$$\begin{aligned} \psi|_r &= \Phi; \quad \psi(x, y, z)|_{t=0} = F_1(x, y, z); \\ T|_r &= G; \quad T(x, y, z)|_{t=0} = F_2(x, y, z); \\ C|_r &= R; \quad C(x, y, z)|_{t=0} = F_3(x, y, z); \\ P|_r &= H; \quad P(x, y, z)|_{t=0} = F_4(x, y, z); \end{aligned} \quad (9)$$

где Φ, G, R, H, F_{1-4} — известные функции.

На основе данной модели с использованием конечно-разностных схем, разработан пакет программ на языке Fortran для персональных компьютеров, позволяющий решать широкий круг задач теплопереноса в пористых средах. Подробное описание модели с примерами ее использования приведено в [4]. Чтобы оценить принципиальную возможность влияния становления интрузива на причину и условия формирования вихревых и кольцевых структур, а также для большей наглядности задача решалась в упрощенной постановке, т. е. без осложнения рассматриваемого объекта разрывными нарушениями, различными исходными составами интрузива, вмещающих пород и их физическими свойствами.

Для расчета был выбран блок в виде прямоугольного параллелепипеда размером в основании 20×20 км и высотой 10 км. Блок разбит объемной, равномерной расчетной сеткой с шагом 500 м по горизонтали и 250 м по вертикали, шаг по времени 100 лет. В центре размещалось интрузивное тело в виде призмы размером $4 \times 4 \times 4$ км с начальной температурой 1000°C (рис. 1). Расчеты проводились на $0,5$ — 1 млн. лет. Параметры системы: коэффициент проницаемости в верхней части разреза (до 2000 м) от 10 до 100 мд, в остальной от 0,1 до 1 мд, пористость $n = 0,1$ во всей области. Геотермический градиент равнялся $3^\circ\text{C}/100$ м. Коэффициент температуропроводности $\alpha = 10^{-6}$ м²/с для всей области. Проницаемость интрузивного тела зависела от температуры и равнялась 0 при температуре $\geq 700^\circ\text{C}$, а при меньших значениях принималась равной проницаемости вмещающих пород.

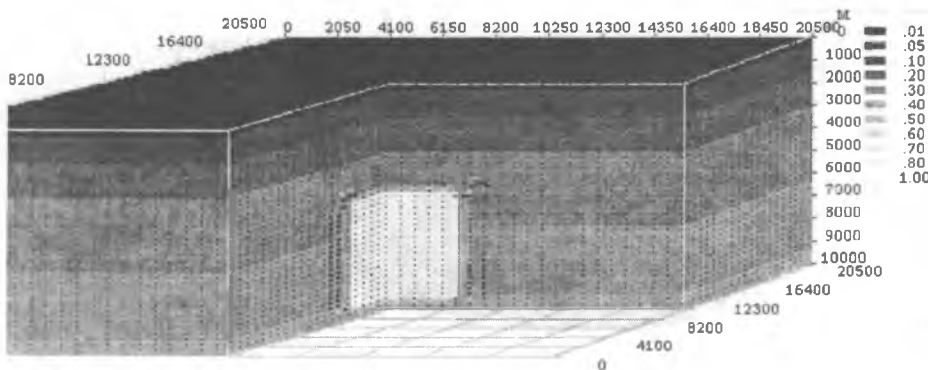


Рис. 1. Схематичный блок-разрез области расчета с начальным распределением температуры ($T_{\max} = 1000, T_{\min} = 5^\circ\text{C}$), вектор скорости фильтрации флюида выделен оттенками серого цвета: 1 — темный, $V_{\max} = 0,05$; 2 — серый, $V_{\max} = 0,01$; 3 — светлый, $V_{\max} = 0,005$ м/год

В интрузив и вмещающие породы вводился нейтральный индикатор для определения мест концентрации и путей распространения веществ, выносимых флюидом из вмещающих пород и интрузива. Верхняя граница была проницаема для всех функций (тепло, поток флюида, вещество), остальные непроницаемы.

Результаты вычислений

Результаты расчетов показали, что в районе становления интрузива за счет градиента температуры возникает поток флюида вихревой структуры. Такая структура формируется в вертикальных и в горизонтальной плоскостях, так как при движении вверх флюид закручивается против часовой, а при движении вниз — по часовой стрелке. Закручивание идет за счет сопротивления движению флюида вверх и вниз.

Величина закручивания или скорость горизонтального движения флюида обратно пропорциональна вертикальной проницаемости пород, через которые он фильтруется. В потоке можно выделить три части: восходящую, переходную (транзитную) и нисходящую, которые образуют гидродинамическую зональность. При этом в переходной зоне формируются вторичные вихревые структуры, способствующие застойным явлениям, и зона работает как гидродинамический барьер, в которой циркулирует попавшее туда вещество.

Гидродинамические зоны образуют вокруг интрузива три вложенные одна в другую цилиндри-

ческие поверхности, скрученные в верхней части против часовой, а в нижней по часовой стрелке. Толщина поверхностей зависит от формы и размера интрузива и проницаемости вмещающих пород. Скорость движения флюида уменьшается от первой зоны к третьей. Во всех зонах протекает изменение пород (гидротермальный метасоматоз) и формирование скрученных цилиндрических областей преобразованных пород. Самое активное преобразование пород идет в области восходящего и транзитного потоков вследствие высоких температур и максимальных скоростей движения флюида. При этом вещество, выносимое из интрузива, в основном концентрируется в переходной зоне потока на гидродинамическом барьере (в районе вторичных вихрей), где скорее всего и формируются рудные залежи (рис. 2). В области нисходящего потока преобразование пород идет в основном в результате инфильтрации метеорных или морских вод, затягиваемых общей циркуляцией.

Со временем на основе гидродинамической зональности (структуры) формируется петролого-геохимическая зональность, характеризующаяся различными по физико-химическим свойствам преобразованными породами для каждой зоны, соответствующая по размерам и форме гидродинамической зональности. Состав и физико-химические свойства пород для каждой из зон зависят от времени функционирования системы, исходного состава интрузива и вмещающих пород, активности циркулирующих в этих зонах вод (рис. 3).

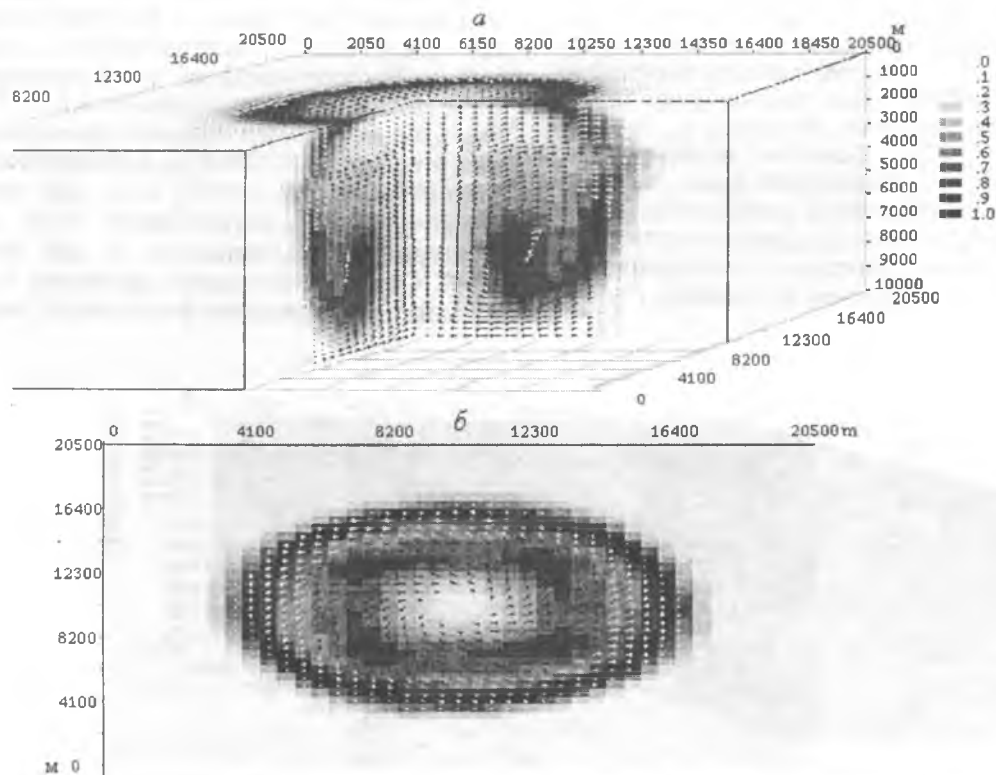


Рис. 2. Распределение индикатора, вынесенного потоком флюида из интрузива, и вектора скорости фильтрации через 200 000 лет: а — блокочный разрез; б — срез на глубине 5 000 м, $V_{\max} = 0,1; 0,05; 0,01$ м/год

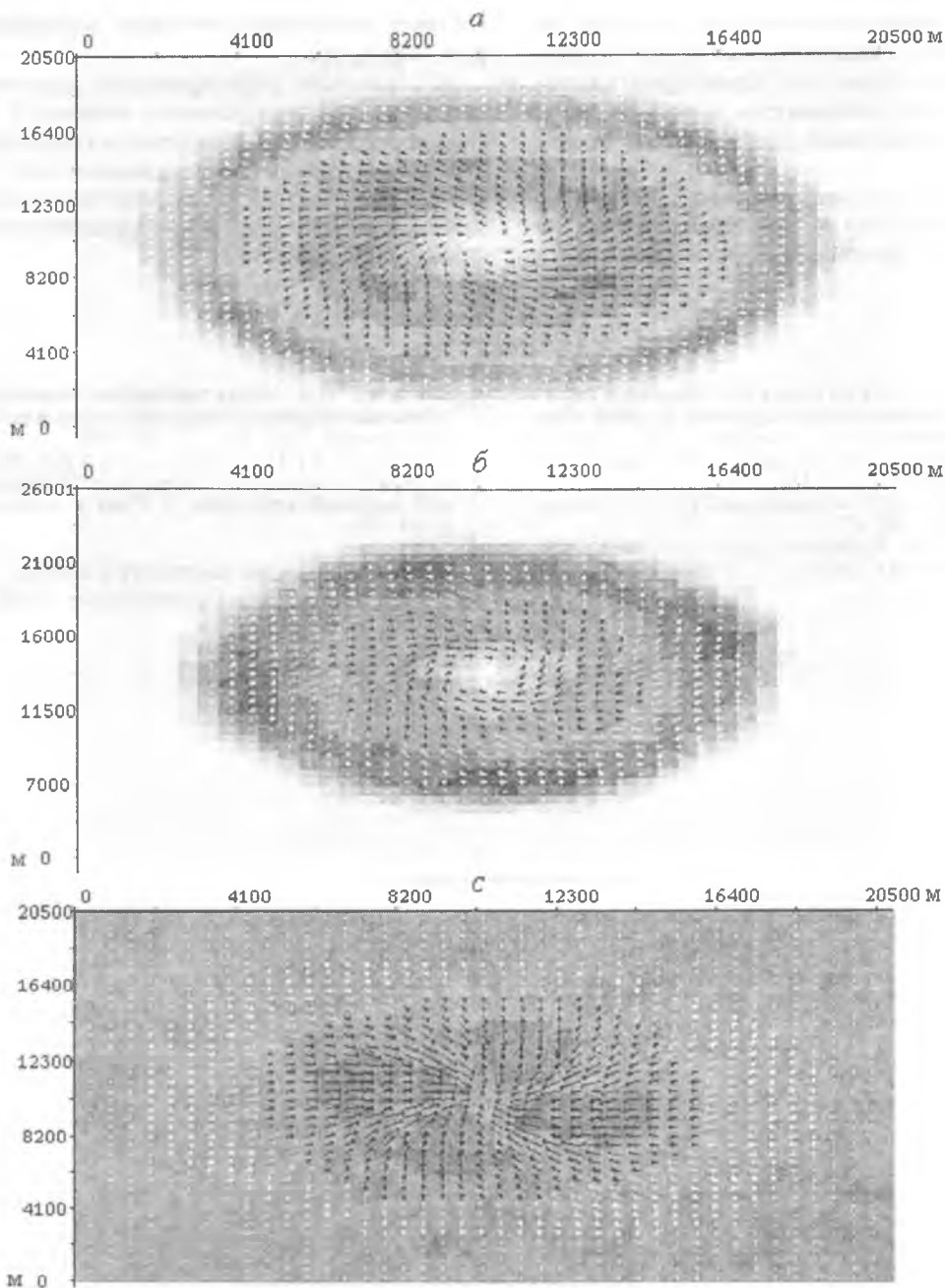


Рис. 3. Распределение индикатора, вынесенного потоком флюида из интрузива, и вектора скорости фильтрации через 200 000 лет в разных точках разреза: *а* — выше интрузива на глубине 2500 м, *б* — через нижнюю часть интрузива на глубине 7500 м, *в* — под интрузивом на глубине 10000 м, диапазон скоростей фильтрации показан на рис. 2

В дальнейшем, после формирования петролого-геохимической структуры в процессе выветривания и денудации, слабые породы будут разрушаться более активно, чем прочные, что может привести к образованию геоморфологической структуры, повторяющей формы исходной. Во время тектонических процессов могут образоваться разломы дугообразной формы, повторяющие зональность. Это в конечном итоге может привести к формированию кольцевых, вихревых тектонических и геоморфологических структур. Другими словами, вихревые и кольцевые структуры — ре-

ликты пород, испытавшие воздействие флюидных потоков (водно-солевых растворов) вокруг остывавшего интрузивного тела.

Выводы

1. В районе становления интрузива за счет градиента температур формируются кольцевые, вихревые, винтовые гидродинамические структуры, характеризующиеся различными скоростями и направлением движения потоков флюида.

2. На основе гидродинамических структур за счет выноса—привноса вещества возникают петролого-геохимические структуры, характеризующиеся разными степенями проработки пород флюидами, физическими свойствами и химическим составом.

3. На основе петролого-геохимических структур в процессе выветривания и денудации пород на фоне тектонических процессов могут образоваться

тектоно-геоморфологические кольцевые и вихревые структуры.

4. Механизм формирования кольцевых и вихревых структур определяется цепочкой взаимосвязанных событий по замещению гидродинамической структуры петролого-геохимической, которая замещается тектоно-геоморфологической. Такой процесс можно назвать «гидропетрогеодинамическим» изоморфизмом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсеньев В.А., Корчуганова Н.И. Вихревые структуры континентов: новые аспекты строения, условий образования, металлогенического значения (на примере юго-восточной части Канадского щита) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2000. № 4. С. 134–138.
2. Бондырев И.В. Кольцевые структуры Грузии // Геотектоника. 2003. № 2. С. 98–108.
3. Глуховский М.В. Кольцевые структуры юго-востока Сибири и их возможная природа // Геотектоника. 1978. № 4. С. 50–63.
4. Гунин В.И. Новая трехмерная математическая модель тепломассопереноса в пористых средах и ее возможности // Геоэкология. 2003. № 4. С. 355–370.
5. Кузков Г.Н., Двоглазов Д.А. Об астенолитовой модели Среднего Урала и строении Шарташской золоторудной вихревой структуры // Руды и металлы. 2002. № 4. С. 63–72.

Геологический институт СОРАН, г. Улан-Удэ
Рецензент — Ю.Н. Серокуров