УДК 550.84.092

Н.А.КАСЬЯНКОВА
Геолого-разведочный факультет,
аспирант кафедры геофизических и геохимических методов поисков
и разведки месторождений полезных ископаемых

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ ГИДРОТЕРМ ОКЕАНОВ

Формирование массивных сульфидных руд с огромными запасами меди, цинка, золота и других металлов связано с гидротермальной деятельностью на дне океанов на глубине 3-4 км. Гидротермальные растворы выносят через дно океана смесь сульфидов тяжелых металлов, небольшая часть которых отлагается вблизи гидротермального источника в виде различных рудных построек, а основная масса рассеивается придонными течениями на расстояние десятков километров, формируя ореолы рассеяния гидротерм океанов. Картирование таких ореолов применяют для поисков массивных руд. Детальное изучение ореолов рассеяния гидротерм затруднено тем, что необходимо проводить исследования на глубине более 3 км. Для получения дополнительной информации можно использовать математическое моделирование ореолов гидротерм, результаты которого могут быть применены для интерпретации экспериментальных данных. Результаты численных расчетов ореолов рассеяния гидротермальных источников хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работах [3, 5].

Massive ores with high concentration of copper, zinc, gold and other metals are forming as a result of high-temperature hydrothermal venting through the ocean floor at the depth of 3-4 kilometers. A small part of suspended sulfides of metals, which are transported through the ocean floor with hydrothermal solutions precipitate near vents, but a most of these suspended metals disperse in surrounded water at several tens of kilometers by bottom flows forming hydrothermal plumes. Ores prospecting based on these plumes investigations. Nowadays many experimental data are collected all over the world, but necessity of researching objects under 3-4 kilometers of water is troubling realization of experimental investigations. Somewhere the experimental data may be successfully accomplished with a numeric modeling of a hydrothermal plume's structure in the ocean. Results of numeric modeling of plumes can be used to interpret experimental data. The data of the numeric calculations of hydrothermal plumes presented in this article are fitted the experimental data cited from [3, 5].

Минеральные запасы Мирового океана огромны. В промышленных масштабах в Мировом океане эксплуатируются месторождения нефти и газа, россыпные месторождения олова, редких земель, золота, алмазов, месторождения строительных материалов и др. Такие полезные ископаемые, как железомарганцевые конкреции и массивные сульфидные руды, перспективны для промышленного освоения в недалеком будущем.

Формирование массивных сульфидных руд с огромными запасами меди, цинка, золота и других металлов связано с гидротермальной деятельностью на дне океанов на глубине 3-4 км. Высокотемпературные гидротермальные растворы (350-400 °С), поступая на дно океана, выносят в окружающие воды взвесь сульфидов тяжелых металлов, небольшая часть которых выпадает в осадок вблизи гидротермального выхода, образуя различные богатые рудные постройки. Основная масса тяжелых металлов рассеивается в водной толще на расстояние до нескольких десятков километров, формируя гидротермальные ореолы рассеяния. Согласно наблюдениям специалистов, гидротермальный ореол имеет двухслойное строение. В нижней части происходит рассеяние ореола преимущественно в верти-

кальном направлении: нагретые и, следовательно, менее плотные по сравнению с вмещающей водной толщей гидротермальные воды поднимаются вверх. Постепенно смешиваясь с окружающими водами, гидротермальный раствор остывает, на расстоянии до 800 м от дна плотности гидротермального раствора и вмещающих вод выравниваются и начинается его рассеяние придонными течениями в горизонтальном направлении на десятки километров. Поиск сульфидных руд ведут по таким ореолам рассеяния гидротерм [3, 5].

Детальное изучение ореолов рассеяния гидротерм затруднено тем, что необходимо проводить исследования на глубине более 3 км. Для получения дополнительной информации можно использовать математическое моделирование ореолов гидротерм. Результаты такого моделирования могут быть применены для интерпретации экспериментальных данных.

Теоретическое распределение концентрации в ореоле рассеяния над гидротермальным источником, расположенном на дне океана в стратифицированной двухслойной водной толще найдено в работе [4]:

$$C_1 = \frac{q}{4\pi z D_1} e^{\frac{k_1}{\upsilon_1} z} e^{-\frac{\upsilon_1 (x^2+y^2)}{4 D_1 z}}; \qquad (1)$$

$$C_2 = \frac{q e^{\frac{k_1}{\upsilon_1} H}}{\pi^2 \upsilon_1} \int_0^\infty e^{f\omega^2} \times$$

$$\times \left[\int_0^\infty e^{-\left[f\nu^2 + (z-H)m_2^*\right]} \cos\left((z-H)n_2^* - \nu x\right) d\nu \right] \times$$

$$\times \cos \omega y d\omega, \qquad (2)$$

где C_1 и C_2 – концентрации растворенного компонента в нижнем слое мощностью H и в верхнем слое бесконечной мощности водной толщи океана соответственно; q – мощность точечного источника вещества, расположенного в начале координат (на дне океана); k_1 и k_2 – коэффициенты поглощения растворенного вещества в нижнем и верхнем слоях соответственно; υ_1 – вертикальная составляющая скорости конвекции в нижнем слое; u_2 – горизонтальная составляющая скорости конвекции в верхнем слое; D_1 и D_2 – коэффициенты турбулентной диффузии в нижнем и верхнем слоях водной толщи соответственно, x, y, z – декартовы координаты;

$$m_2^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_2^* + \sqrt{\left(a_2^*\right)^2 + b_2^2}};$$

$$n_2^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{b_2}{\sqrt{a_2^* + \sqrt{\left(a_2^*\right)^2 + b_2^2}}};$$

$$a_2^* = \frac{k_2}{D_2} + \omega^2 + \nu^2;$$

$$b_2 = \frac{u_2 \nu}{D_2};$$

$$f = -\frac{D_1 H}{\upsilon_1}.$$

Для нахождения концентрации растворенного компонента гидротермального ореола в верхнем слое по формуле (2) необходимо вычислить значение двойного интеграла. Одним из методов нахождения значения двойного интеграла является повторное применение различных квадратурных формул [1, 2]. В работе для вычисления кратных интегралов вида (2) были разработаны программы, построенные на повторном применении квадратурных формул Симпсона и Ньютона – Котеса по семи узлам.

Для проверки программ вычисления двойных интегралов и оценки погрешности вычислений было использовано три способа:

1) вычисление кратных интегралов, значения которых могут быть получены аналитически;

2) сравнение результатов вычислений кратных интегралов различными численными методами;

3) проверка тождества равенства концентраций в нижнем и верхнем слоях на границе раздела H, которое должно выполняться по условиям задачи.

Результаты численных расчетов различных кратных интегралов, значения которых находятся аналитически, сходятся к своим истинным ответам с увеличением точности вычислений.

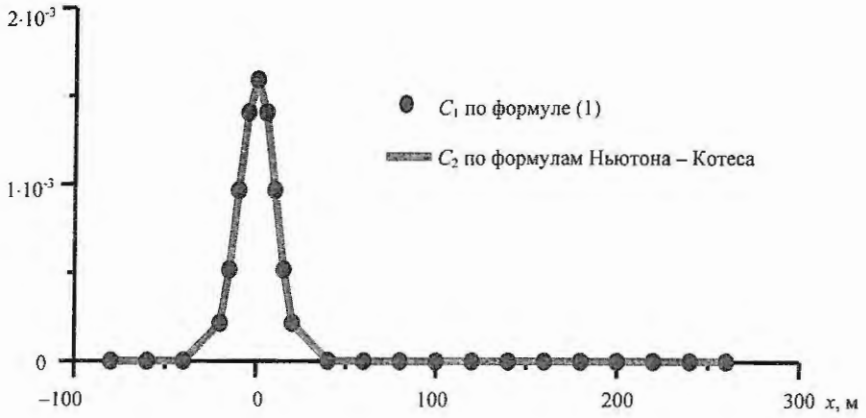


Рис.1. Графики концентраций компонента в гидротермальном ореоле при $z = H$.
Параметры модели: $\upsilon_1 = 10^{-5}$ м/с, $D_1 = 10^{-5}$ м^2/с, $k_1 = 10^{-20}$ с$^{-1}$, $u_2 = 10^{-5}$ м/с, $D_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ м^2/с, $k_2 = 10^{-20}$ с$^{-1}$, $H = 50$ м, TOL = 10^{-5}

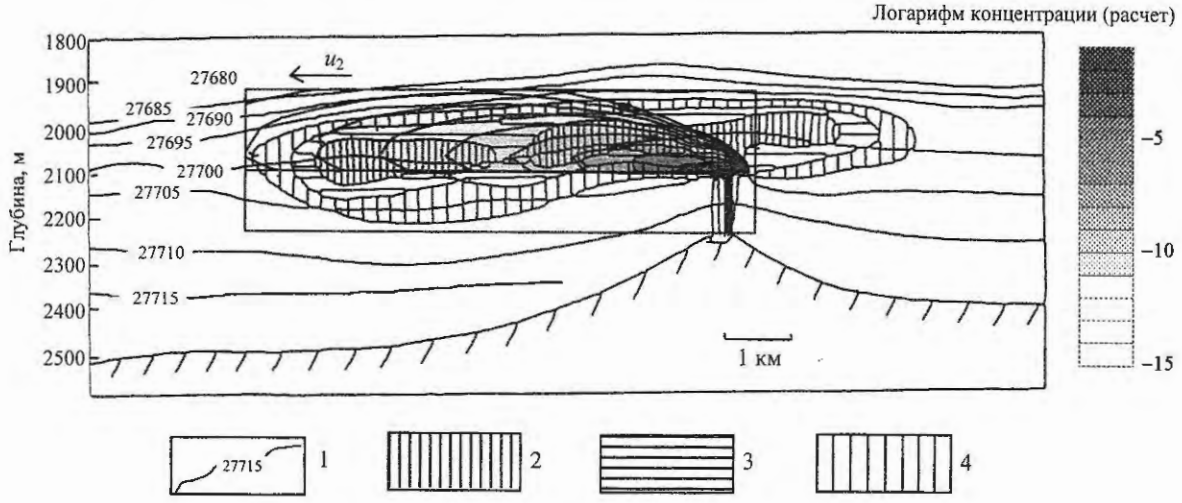


Рис.2. Результаты математического моделирования гидротермального ореола рассеяния в районе хребта Хуан-де-Фука

1 – изопикны; 2 – при коэффициенте ослабления света $k_c > 0{,}040$ м$^{-1}$; 3 и 4 – при $k_c = 0{,}025 \div 0{,}040$ м$^{-1}$ и $k_c = 0{,}010 \div 0{,}025$ м$^{-1}$ соответственно

Расчеты двойных интегралов различными методами (с помощью квадратурных формул Симпсона и Ньютона – Котеса по семи узлам) показывают хорошее соответствие вычислений.

На границе раздела $z = H$ концентрации в нижнем и верхнем слоях равны в пределах заданной погрешности вычислений (рис.1). Следовательно, разработанные программы для вычисления двойных интегралов могут быть применены для численного моделирования ореолов рассеяния высокотемпературных гидротерм.

Сравнение расчетных гидротермальных ореолов с экспериментальными данными [3, 5] показывает удовлетворительное соответствие теории и натурных съемок. Например, экспериментальные данные, полученные для гидротермального источника в районе хребта Хуан-де-Фука в Тихом океане [3] удовлетворительно совпадают с теоретическими расчетными данными при следующих значениях параметров: $\upsilon_1 = 0{,}001$ м/с, $D_1 = 0{,}0001$ м^2/с, $k_1 = 10^{-6}$ с$^{-1}$, $u_2 = 0{,}0005$ м/с, $D_2 = 0{,}0001$ м^2/с, $k_2 = 10^{-6}$ с$^{-1}$, $H = 140$ м (рис.2). В теоретической модели принято постоянное направление горизонтальной скорости течения вод во втором слое $\vec{u}_2$ (справа налево). Расхождение расчетного

ореола и ореола, экспериментально зафиксированного справа от гидротермального источника, может быть объяснено возможным временным изменением направления скорости $\vec{u}_2$ на противоположное за время существования данного источника.

Сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования позволяет сделать выводы, что рассмотренная теория ореолов рассеяния высокотемпературных гидротермальных источников Мирового океана и примененные алгоритмы моделирования этих ореолов удовлетворительно описывают закономерности строения известных гидротерм океана и могут быть применены для выявления новых закономерностей строения ореолов рассеяния гидротерм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хемминг Р.В.* Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968.

2. *Бахвалов Н.С.* Численные методы: Учеб. пособие / Н.С.Бахвалов, Н.П.Жидков, Г.М.Кобельков. М.: Наука, 1987.

3. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана. СПб: Недра, 1992.

4. *Путиков О.Ф.* Физико-математическая теория ореола рассеяния гидротермального источника в океане / О.Ф.Путиков, С.М.Судариков // Записки Горного института. СПб, 2002. Т.151.

5. *Sudarikov S.M.* Structure of hydrothermal plumes at the Logatchev vent field, 14°45′N, Mid-Atlantic Ridge: evidence from geochemical and geophysical data / S.M.Sudarikov, A.B.Roumiantsev // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. Vol.101.

Научный руководитель д.г.-м.н. проф. *О.Ф.Путиков*