УДК 550.84.092

Н.А.КАСЬЯНКОВА
Санкт-Петербургский горный институт

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ ГИДРОТЕРМ ОКЕАНОВ

С выходами высокотемпературных гидротермальных вод в пределах различных вулканически активных структур в Мировом океане связано формирование огромных запасов рудных элементов: Cu, Zn и др. К настоящему времени накоплен большой фактический материал по высокотемпературной гидротермальной деятельности, однако проведение экспериментальных исследований затрудняется тем, что сбор информации проводится с глубин 3-4 км. Неполнота экспериментальных данных может быть частично компенсирована теоретическим исследованием строения ореолов рассеяния гидротерм океанов.

Рассмотрена физико-математическая модель ореола рассеяния гидротермального источника и выполнено численное моделирование этого ореола. Модель устанавливает функциональные зависимости между характеристиками ореолов рассеяния гидротерм, которые удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Численное моделирование ореолов рассеяния гидротерм может применяться для заполнения пробелов в экспериментальных данных и анализа результатов полевых исследований.

A huge ore reserves of such metals as Cu, Zn, etc. are forming in connection with high-temperature hydrothermal venting within active volcanic structures in the ocean. Nowadays many experimental data are collected all over the world, but necessity of researching objects under 3-4 km of water is troubling realization of experimental investigations. The experimental data incompleteness can be partially compensated by theoretical study of a structure of hydrothermal plumes in the ocean.

The physical and mathematical model of a hydrothermal plume is considered in the article. Numeric modeling of the structure of plumes based on the theoretical model are established there. Theoretical dependencies between parameters of plumes have good correlation with experimental data. Numeric modeling of the structure of plumes is used to interpolate between rare experimental data and analyze results of experimental researches.

С выходами высокотемпературных гидротермальных вод в пределах различных вулканически активных структур в Мировом океане связано формирование огромных запасов рудных элементов: Cu, Zn, Co, Mo и др. Несмотря на то, что гидротермальные источники находятся на глубине нескольких километров, они представляют интерес с точки зрения промышленного освоения [1].

Гидротермальный раствор, поступая на поверхность дна, выносит из горных пород рудные элементы в растворенной и взвешенной формах. Основная часть выносимых металлов рассеивается в океане течениями на расстояние в несколько десятков километров и более, а остальное осаждается вблизи источника, образуя скопления массивных сульфидных руд. Кроме формирования больших аномалий взвешенных и растворенных форм металлов, наличие гидротермальной деятельности приводит к изменению параметров гидрохимических полей: потенциальной температуры, солености, мутности и др. Изучение геохимических и связанных с ними гидрофизических полей проводят для поисков гидротерм [1].

К настоящему времени накоплен большой фактический материал по высокотемпературной гидротермальной деятельности, однако проведение экспериментальных исследований затрудняется тем, что сбор информации проводится с глубин 3-4 км [1-5]. Неполнота экспериментальных данных может быть частично компенсирована теоре-

тическим исследованием строения ореолов рассеяния гидротерм океанов. Теоретически установленные зависимости между характеристиками гидротермальных ореолов могут быть использованы для моделирования и анализа строения реальных ореолов.

Обратимся к разработанной в Санкт-Петербургском горном институте проф. О.Ф.Путиковым физико-математической модели ореола рассеяния гидротерм океана.*

Согласно экспериментальным данным, ореол рассеяния гидротерм является стратифицированным, т.е. состоящим из двух слоев. Поступающий на поверхность дна гидротермальный раствор значительно отличается по температуре от придонных вод. Нагретые, а следовательно, менее плотные гидротермальные воды поднимаются вверх, быстро смешиваясь с вмещающими водами. Так образуется вытянутая вертикально нижняя часть ореола. На определенной высоте от поверхности дна (от 50 до 800 м) происходит изопикническое выравнивание сильно разбавленного гидротермального раствора и вмещающих вод. За счет течений начинается рассеяние взвешенных и растворенных форм химических элементов преимущественно в горизонтальной плоскости на десятки километров [1]. Соответственно физико-математическая модель ореола рассеяния гидротермального источника включает два слоя: в нижнем слое вводятся компоненты вектора скорости квазиконвекции (вертикальная скорость квазиконвекции υ_1, обусловленная градиентом плотности, и горизонтальная скорость, связанная с течением воды в горизонтальной плоскости u_1); в верхнем слое – векторы скорости υ_2 и u_2. В обоих слоях воды наблюдается переход растворенного вещества в твердую фазу путем выпадения в осадок или сорбции на взвешенных частицах.

Для такого стратифицированного разреза водной толщи океана рассмотрим распределение концентрации в нижнем и верхнем слоях (соответственно C_1 и C_2) для точечного источника растворенного вещества на дне. Для этого введем декартову систему координат (x, y, z) с началом на дне океана в месте расположения точечного источника вещества мощностью q (в месте выхода гидротерм); осью z, направленной вертикально вверх; осью x, направленной вдоль коллинеарных векторов скоростей u_1 и u_2, и осью y, нормальной к плоскости x, z (см. рис.1 в упомянутой статье).

Примем для простоты, что параметры нижнего и верхнего слоев имеют постоянные значения: для нижнего слоя вертикальная составляющая скорости конвекции υ_1, горизонтальная составляющая скорости конвекции u_1 и коэффициент диффузии D_1; для верхнего слоя соответственно υ_2, u_2 и D_2. Во многих случаях для нижнего слоя водной толщи океана можно не учитывать диффузию растворенного вещества по вертикали, скорость которой существенно меньше скорости конвективного переноса, и пренебречь конвективным переносом в горизонтальном направлении, т.е. положить

$$\left|\upsilon_1 \frac{\partial C_1}{\partial z}\right| >> \left|\frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2}\right|; \; u_1 = 0.$$

Как показывают экспериментальные данные, вертикальная составляющая скорости конвекции в нижнем слое изменяется от максимальной у дна океана до нулевой на границе нижнего и верхнего слоев водной толщи. Поэтому в верхнем слое можно пренебречь конвективным переносом, т. е. положить $\upsilon_2 = 0$. В этом случае распределение концентрации растворенного вещества в нижнем и верхнем слоях подчиняется системе двух стационарных дифференциальных уравнений конвективной диффузии:

$$\frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_1}{\partial y^2} - \frac{\upsilon_1}{D_1}\frac{\partial C_1}{\partial z} - \frac{k_1}{D_1} C_1 = 0; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_2}{\partial y^2} - \frac{u_2}{D_2}\frac{\partial C_2}{\partial x} - \frac{k_2}{D_2} C_2 = 0,$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты поглощения растворенного вещества в первом и во втором слоях соответственно, обусловленного выпадением вещества в осадок и сорбцией.

* См. статью О.Ф.Путикова и С.М.Сударикова в настоящем сборнике.

Граничные условия, отражающие наличие точечного источника вещества мощностью q в начале координат, непрерывность концентраций и нормальных составляющих плотности потока вещества на границе слоев (при $z = H$) и убывание концентрации до нуля при удалении от точечного источника, имеют вид

$$\upsilon_1 C_1\big|_{z=0} = q\delta(x)\delta(y), \qquad (2)$$

где $C_1\big|_{z=H} = C_2\big|_{z=H}$; $\upsilon_1 C_1\big|_{z=H} = -D_2 \dfrac{\partial C_2}{\partial z}\Big|_{z=H}$;

$C_2\big|_{z\to\infty} \to 0$; $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, определяемая соотношениями

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0; \\ 0, & x \neq 0; \end{cases} \qquad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)dx = 1.$$

Решая задачу (1)-(2) методом интегральных преобразований Фурье по координате x и косинус-преобразования Фурье по координате y, получим выражения для изображений Φ_1 и Φ_2 концентраций C_1 и C_2 соответственно

$$C_1 = \frac{q}{4\pi D_1 z} e^{-\frac{k_1}{\upsilon_1} z} e^{-\frac{\upsilon_1 (x^2+y^2)}{4D_1 z}}. \qquad (3)$$

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

$$\times \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{-Av^2 + Bm_2^*} (\cos Bn_2^* \cos \nu x + \sin Bn_2^* \sin \nu x) d\nu \right] \times$$

$$\times \cos \omega y d\omega = \frac{q e^{-\frac{k_1}{\upsilon_1} H}}{\pi^2 \upsilon_1} \int_0^{\infty} e^{-A\omega^2} \times$$

$$\times \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{-Av^2 + Bm_2^*} (\cos Bn_2^* - \nu x) d\nu \right] \cos \omega y d\omega; \qquad (4)$$

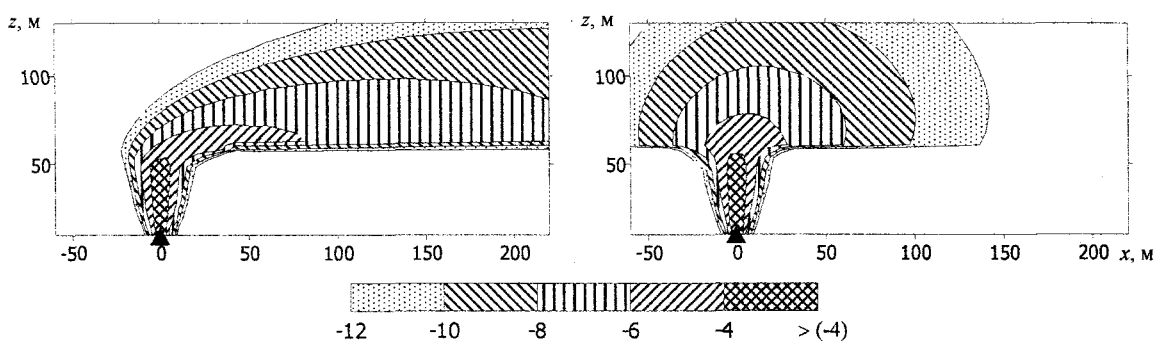
$$A = D_1 H / \upsilon_1; \quad B = z - H,$$

где m_2^* и n_2^* – коэффициенты, зависящие от физических параметров разреза.

По формулам (3) и (4) выполнено численное моделирование ореолов рассеяния гидротерм океанов. Значения параметров, входящих в выражения (3) и (4) были выбраны по литературным источникам [1-5]. Как показали результаты численного моделирования, теоретические зависимости удовлетворительно описывают экспериментальные данные.

Численное моделирование ореолов гидротерм может быть использовано для определения влияния характеристик вмещающих вод на распространение гидротермального ореола. Например, исследовано влияние скорости течения u_2 на форму гидротермального ореола. Чем выше скорость течения, тем, естественно, более вытянут ореол рассеяния. Анализ строения ореолов рассеяния гидротермальных источников для $u_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ м/с (см. рисунок, *а*) и $u_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ м/с (см. рисунок, *б*) показал, что ореол в среде с большим значением скорости течения развит на большей площади, а, следовательно, вероятность его обнаружения при поисках выше.

а *б*



Логарифмы (десятичные) концентраций растворенного вещества в ореоле рассеяния гидротермального источника. Параметры модели $\upsilon_1 = 10^{-3}$ м/с, $D_1 = 10^{-4}$ м^2/с, $D_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ м^2/с, $H = 50$ м
(▲ – гидротермальный источник растворенного вещества)

Выводы

1. Рассмотренные теоретические модели устанавливают функциональные зависимости между характеристиками ореолов рассеяния гидротерм, которые удовлетворительно описывают экспериментальные данные.

2. Численное моделирование ореолов рассеяния гидротерм может быть использовано для заполнения пробелов в экспериментальных данных и анализа результатов экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана / ВНИИ геологии и минеральных ресурсов Мирового океана. СПб: Недра, 1992.

2. *Краснов С.Г.* Химический состав и происхождение океанских рудообразующих гидротерм / С.Г.Краснов, С.М.Судариков // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5.

3. *Краснов С.Г.* Металлы во взвесях придонных вод района высокотемпературной гидротермальной деятельности на Восточно-Тихоокеанском поднятии / С.Г.Краснов, Г.А.Черкашев, Г.П.Гринберг, А.Г.Никоненко // ДАН СССР. 1989. Т.307. № 4.

4. *Судариков С.М.* Строение гидротермальных ореолов рассеяния Тихого и Атлантического океанов / С.М.Судариков, Г.А.Черкашев // Докл. РАН. 1993. Т.330. № 6.