УДК 550.84.092

О.Ф.ПУТИКОВ, С.М.СУДАРИКОВ
Санкт-Петербургский горный институт

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ОРЕОЛА РАССЕЯНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА В ОКЕАНЕ

Представлена физико-математическая модель формирования ореола рассеяния гидротермального источника, расположенного на дне океана. Согласно экспериментальным данным, формирование такого ореола происходит в стратифицированной (двухслойной) среде. Решена система стационарных дифференциальных уравнений конвективной диффузии при постоянных значениях вертикального и горизонтального компонентов вектора скорости квазиконвекции, коэффициента диффузии, коэффициента поглощения растворенного вещества, учитывающего переход растворенного вещества в твердую фазу путем выпадения в осадок или сорбции на взвешенных частицах, внутри каждого из слоев. Приведены решения упрощенной системы стационарных дифференциальных уравнений конвективной диффузии. Разработанная модель удовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные данные, что позволяет рекомендовать ее для теоретического изучения распределения концентрации подвижного компонента в гидротермальном ореоле.

The physical and mathematical model of a hydrothermal plume situated on the ocean floor is developed in the article. Due to experimental data hydrothermal plumes are forming in stratificated two layer environment. The system of stationary differential equations of quasyconvective diffusion for constant values of vertical and horizontal rates of convection, coefficient of diffusion, coefficient of dissolved component absorption inside of every layer is solved in the article. Also a decision of the system of simplified equations of quasyconvective diffusion is presented there. Because of theoretical dependencies between parameters of plumes fitting experimental data the theoretical model is recommended for studying of structure of hydrothermal plumes.

Явление струйных ореолов рассеяния – близвертикального переноса подвижных форм металлов от их источника к поверхности Земли, открыто в 1960-х гг. Это явление эффективно используется для поисков рудных и нефтегазовых месторождений суши, так как позволяет выявлять полезные ископаемые в различных геологических условиях на значительных глубинах [1, 7]. Для месторождений суши разработана физико-математическая теория формирования струйных ореолов, в основу которой положен квазиконвективный перенос подвижных форм металлов пузырьками газов к поверхности земли [5-7]. Однако явление струйных ореолов рассеяния распространяется не только на литосферу, но и на гидросферу. Соответственно, не менее актуально создание физико-математической модели струйных ореолов в водной толще морей и океанов, тем более, что экспериментальное изучение водных ореолов связано с большими техническими трудностями, чем изучение ореолов суши. Установленные теоретические зависимости между параметрами ореолов и характеристиками вмещающей среды помогут в решении практических поисковых задач.

Основной особенностью струйных ореолов в водной толще по сравнению со струйными ореолами на суше является наличие не только вертикального конвективного (квазиконвективного) переноса вещества, но и существенное влияние горизонтальной конвекции, связанной с действием морских течений.

В зависимости от механизма вертикального переноса вещества струйные ореолы рассеяния в водной толще морей и океанов можно разделить на два типа:

Санкт-Петербург. 2002

• ореолы, вызванные явной конвекцией в вертикальном направлении, – ореолы гидротерм, вытекающих из дна океанов [2-4, 8, 9];

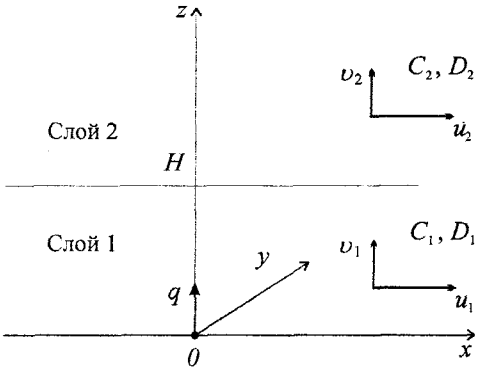
• ореолы рассеяния месторождений полезных ископаемых, залегающих в горных породах ниже дна морей и океанов, обусловленные квазиконвективным переносом вещества всплывающими микропузырьками газов.

В статье предложена физико-математическая модель ореола рассеяния от гидротермального источника, расположенного на дне океана, деятельность которого приводит к поступлению в водную толщу растворов металлов (Mn, Fe, Cu, Zn и др.) [2].

Установлено, что гидротермы вытекают из дна океанов в виде близвертикальных струй небольшого диаметра (около 10 см) [2]. Вертикальную направленность струй исследователи связывают с всплыванием более нагретых (и менее плотных) гидротерм в более холодных окружающих водах океана. При выравнивании температур вод гидротерм и океана на некоторой высоте от дна океана (обычно в пределах 100-800 м) прекращается и вертикальная их конвекция. Такой разрез водной толщи у дна океана назван стратифицированным [2].

Стратифицированный разрез состоит из двух слоев. Нижний слой мощностью H, прилегающий ко дну океана, характеризуется вертикальной скоростью конвекции v_1, горизонтальной скоростью конвекции u_1, коэффициентом диффузии D_1 и коэффициентом поглощения растворенного вещества k_1, учитывающим переход растворенного вещества в твердую фазу путем выпадения в осадок или сорбции на взвешенных частицах. Для верхнего слоя аналогично вводятся параметры v_2, u_2, D_2 и k_2. В первом приближении можно рассматривать эти параметры нижнего и верхнего слоев как постоянные величины.

Установим распределение концентрации C_1 в нижнем слое и C_2 в верхнем слое растворенного компонента в гидротермальном ореоле точечного источника вещества на дне океана в стратифицированном двухслойном разрезе. Введем декартову систему координат $(0, x, y, z)$ с началом на дне океана в месте расположения точечного источника вещества мощностью q (в месте выхода гидротермы); осью z, направленной вертикально вверх; осью x, направленной вдоль коллинеарных векторов скоростей u_1 и u_2, и осью y, нормальной к плоскости xz (см. рисунок).



Точечный источник мощностью q на дне океана в стратифицированной двухслойной водной толще

Распределение концентраций растворенного вещества в нижнем и в верхнем слоях описывается системой двух стационарных дифференциальных уравнений конвективной диффузии:

$$\frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2}+\frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C_1}{\partial y^2}-$$

$$-\frac{u_1}{D_1}\frac{\partial C_1}{\partial x}-\frac{v_1}{D_1}\frac{\partial C_1}{\partial z}-\frac{k_1}{D_1}C_1=0\,; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2}+\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C_2}{\partial y^2}-$$

$$-\frac{u_2}{D_2}\frac{\partial C_2}{\partial x}-\frac{v_2}{D_2}\frac{\partial C_2}{\partial z}-\frac{k_2}{D_2}C_2=0\,. \qquad (2)$$

Граничные условия и условия на бесконечности имеют вид:

$$\left(-D_1\frac{\partial C_1}{\partial z}+v_1C_1\right)\Big|_{z=0}=q\delta(x)\delta(y)\,; \qquad (3)$$

$$C_1\big|_{z=H}=C_2\big|_{z=H}\,; \qquad (4)$$

$$\left(-D_1\frac{\partial C_1}{\partial z}+v_1C_1\right)\Big|_{z=H}=\left(-D_2\frac{\partial C_2}{\partial z}+v_2C_2\right)\Big|_{z=H}\,; \qquad (5)$$

$$C_2\big|_{z\to\infty} \to 0 \ , \qquad (6)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, определяемая соотношениями

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

Систему уравнений (1)-(2) при краевых условиях (3)-(6) решают методом интегрального преобразования Фурье по координате x и косинус-преобразования Фурье по координате y. Распределение концентрации компонента в гидротермальном ореоле имеет вид

$$C_1=\frac{q}{\pi^2 D_1}\int_0^{\infty}\left[\int_0^{\infty}\frac{e^{-zA_1}B_1}{\varphi_3^2+\psi_3^2}d\nu\right]\cos\omega y d\omega;$$

$$C_2=\frac{2q}{\pi^2 D_1}\int_0^{\infty}\left[\int_0^{\infty}\frac{e^{-HA_1}e^{-(z-H)A_2}B_2}{\varphi_3^2+\psi_3^2}d\nu\right]\times$$

$$\times\cos\omega y d\omega,$$

где

$$A_1=m_1-\frac{\upsilon_1}{2D_1};\quad A_2=m_2-\frac{\upsilon_2}{2D_2};$$

$$m_1=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{a_1+\sqrt{a_1^2+b_1^2}};$$

$$m_2=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{a_2+\sqrt{a_2^2+b_2^2}};$$

$$a_1=\left(\frac{\upsilon_1}{2D_1}\right)^2+\frac{k_1}{D_1}+\omega^2+\nu^2;\quad b_1=\frac{u_1\nu}{D_1},$$

$$a_2=\left(\frac{\upsilon_2}{2D_2}\right)^2+\frac{k_2}{D_2}+\omega^2+\nu^2,\quad b_2=\frac{u_2\nu}{D_2},$$

$$B_1=M_1\cos\nu x-N_1\sin\nu x;$$

$$B_2=M_2\cos\nu x-N_2\sin\nu x;$$

$$M_1=(\varphi_1\varphi_3+\psi_1\psi_3)\cos zn_1+$$
$$+(\psi_1\varphi_3-\varphi_1\psi_3)\sin zn_1;$$

$$N_1=(\psi_1\varphi_3-\varphi_1\psi_3)\cos zn_1-$$
$$-(\varphi_1\varphi_3+\psi_1\psi_3)\sin zn_1;$$

$$M_2=(m_1\varphi_3+n_1\psi_3)\cos[Hn_1+(z-H)n_2]+$$
$$+(n_1\varphi_3-m_1\psi_3)\sin[Hn_1+(z-H)n_2];$$

$$N_2=(n_1\varphi_3-m_1\psi_3)\cos[Hn_1+(z-H)n_2]-$$
$$-(m_1\varphi_3+n_1\psi_3)\sin[Hn_1+(z-H)n_2];$$

$$\varphi_1=\alpha_1+[\alpha_2\cos[2n_1(H-z)]+$$
$$+\beta_2\sin[2n_1(H-z)]]e^{-2m_1(H-z)};$$

$$\psi_1=\beta_1+[\beta_2\cos[2n_1(H-z)]-$$
$$-\alpha_2\sin[2n_1(H-z)]]e^{-2m_1(H-z)};$$

$$n_1=\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{b_1}{\sqrt{a_1+\sqrt{a_1^2+b_1^2}}};$$

$$n_2=\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{b_2}{\sqrt{a_2+\sqrt{a_2^2+b_2^2}}};$$

$$\varphi_3=\left(\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1\right)\left[\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1+\frac{D_2}{D_1}\left(\frac{\upsilon_2}{2D_2}+m_2\right)\right]-$$

$$-n_1\left(n_1+\frac{D_2}{D_1}n_2\right)-e^{-2m_1H}\left\{\left[\left(-\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1\right)\times\right.\right.$$

$$\times\left[\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1-\frac{D_2}{D_1}\left(\frac{\upsilon_2}{2D_2}+m_2\right)\right]-$$

$$\left.-n_1\left(n_1-\frac{D_2}{D_1}n_2\right)\right]\cos 2n_1H+$$

$$+\left[n_1\left[\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1-\frac{D_2}{D_1}\left(\frac{\upsilon_2}{2D_2}+m_2\right)\right]+\right.$$

$$\left.+\left(-\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1\right)\left(n_1-\frac{D_2}{D_1}n_2\right)\right]\sin 2n_1H\Big\};$$

$$\psi_3=n_1\left[\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1+\frac{D_2}{D_1}\left(\frac{\upsilon_2}{2D_2}+m_2\right)\right]+$$

$$+\left(\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1\right)\left(n_1+\frac{D_2}{D_1}n_2\right)+$$

$$+e^{-2m_1H}\left\{\left[\left(-\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1\right)\left[\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1-\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{D_2}{D_1}\left(\frac{\upsilon_2}{2D_2}+m_2\right)\right]-n_1\left(n_1-\frac{D_2}{D_1}n_2\right)\right]\sin 2n_1H-$$

$$-\left[n_1\left[\frac{\upsilon_1}{2D_1}+m_1-\frac{D_2}{D_1}\left(\frac{\upsilon_2}{2D_2}+m_2\right)\right]+\right.$$

$$+\left(-\frac{v_1}{2D_1}+m_1\right)\left(n_1-\frac{D_2}{D_1}n_2\right)\Bigg]\cos 2n_1H\Bigg\};$$

$$\alpha_1=-\frac{v_1}{2D_1}+\frac{D_2}{D_1}\frac{v_2}{2D_2}+m_1-\frac{D_2}{D_1}m_2;$$

$$\beta_1=n_1+\frac{D_2}{D_1}n_2;$$

$$\alpha_2=\frac{v_1}{2D_1}-\frac{D_2}{D_1}\frac{v_2}{2D_2}+m_1-\frac{D_2}{D_1}m_2;$$

$$\beta_2=n_1-\frac{D_2}{D_1}n_2.$$

Как следует из опыта экспериментальных исследований гидротерм океанов, допустимы следующие упрощения:

- в нижнем слое можно пренебречь диффузией растворенного вещества по вертикали по сравнению с конвективным его переносом:

$$\left|\frac{v_1}{D_1}\frac{\partial C_1}{\partial z}\right|>>\left|\frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2}\right|;$$

- в этом же слое можно пренебречь конвективным переносом в горизонтальном направлении, т.е. положить $u_1=0$;
- в верхнем слое можно пренебречь конвективным переносом по вертикали по сравнению с диффузионным, т. е. положить $v_2=0$.

В этом случае распределение концентраций в верхнем и нижнем слоях имеет вид

$$C_1=\frac{q}{4\pi D_1 z}e^{-\frac{k_1}{v_1}z}e^{-\frac{v_1(x^2+y^2)}{4D_1z}};$$

$$C_2=\frac{q\,e^{-\frac{k_1}{v_1}H}}{\pi^2 v_1}\int_0^\infty e^{-\frac{D_1H}{v_1}\omega^2}F\cos\omega y d\omega;$$

$$F=\int_{-\infty}^{\infty}e^{-\left[\frac{D_1H}{v_1}\nu^2+(z-H)m_2^*\right]}\cos((z-H)n_2^*-\nu x)d\nu;$$

где

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

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

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

Представленная модель удовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные данные, что позволяет рекомендовать ее применение для теоретического изучения распределения концентрации подвижного компонента в гидротермальном ореоле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Возможности применения геоэлектрохимических методов для поисков нефтегазовых месторождений / Ю.С.Рысс, И.С.Гольдберг, В.И.Васильева, Н.А.Ворошилов // Советская геология. 1990. № 6.

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

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

4. *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 // Докл. АН СССР. 1989. Т.307. № 4.

5. *Путиков О.Ф.* О возможном механизме формирования «струйных» ореолов рассеяния / О.Ф.Путиков, А.С.Духанин // Докл. РАН. 1994. Т.338. № 2.

6. Путиков О.Ф. Струйные ореолы рассеяния над нефтегазовыми залежами в неоднородных породах / О.Ф.Путиков, С.А.Вешев, С.Г.Алексеев, Чжоу Цзыюн, Н.А.Касьянкова // Геофизика. 2000. № 1.

7. Путиков О.Ф. Струйные ореолы рассеяния тяжелых металлов нефтегазовых месторождений и их использование при оценке параметров залежей / О.Ф.Путиков, С.А.Вешев, Н.А.Ворошилов, С.Г.Алексеев, Вень Байхун, Чжоу Цзыюн // Докл. РАН. 2000. Т.370. № 5.

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

9. 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.