

Л. М. ГАЛКИН, И. Б. МИЗАНДРОНЦЕВ

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ МНОГОСТАДИЙНОГО РАСПАДА
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ**

(Представлено академиком Н. М. Страховым 17 IX 1969)

Н. М. Страхов (¹), рассматривая содержание органического вещества в жидкой фазе морских осадков, отметил, что эта величина динамически неустойчива и зависит от соотношения интенсивностей процессов, создающих и разрушающих растворимую органику в донных отложениях. В верхних слоях осадков преобладают, как правило, процессы, генерирующие растворенное органическое вещество, а в более глубоких — ее уничтожающие. Вследствие этого в общем случае концентрация органического вещества в грунтовых растворах сначала возрастает по мере углубления в осадки, проходит через максимум на некоторой глубине и затем снижается.

Цель настоящей работы заключается в попытке теоретического описания количественных закономерностей, определяющих содержание и распределение продуктов распада органических остатков в жидкой фазе донных отложений.

Рассмотрим некоторый водоем, в котором протекающие процессы носят квазистационарный характер, в силу чего скорость осадконакопления (V) и весовую долю органического вещества в выпадающих на дно взвешах можно считать величинами постоянными. Для дальнейших рассуждений используем подвижную систему координат, жестко связанную с границей раздела вода — дно (ось z направлена вниз).

Пусть процесс распада проходит через n последовательных стадий, так что распад $(i-1)$ -го продукта пополняет количество i -го продукта. Тогда распределение продуктов распада в толще осадков описывается цепочкой уравнений

$$k_i \frac{d^2 S_i}{dz^2} - V \frac{d S_i}{dz} - \alpha_i S_i + \alpha_{i-1} S_{i-1} = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

с граничными условиями

$$S_i(z)|_{z=0} = S_{0i}, \quad S_i(z)|_{z=\infty} \leq b < \infty, \quad (2)$$

где i — номер стадии, k_i — коэффициент диффузии, S_i — концентрация, α_i — константа распада.

Используя характеристические уравнения $k_i x_i^2 - V x_i - \alpha_i = 0$ и вариации постоянных, получаем общее решение цепочки (1):

$$S_i = c_{i1} e^{x_{i1} z} + c_{i2} e^{x_{i2} z} + \frac{\alpha_{i-1}}{k_i(x_{i2} - x_{i1})} [\Phi_i(z) - \varphi_i(z)], \quad (3)$$

где

$$x_{i1} = \frac{V - \sqrt{V^2 + 4\alpha_i k_i}}{2k_i}, \quad x_{i2} = \frac{V + \sqrt{V^2 + 4\alpha_i k_i}}{2k_i}, \quad (4)$$

$$\Phi_i(z) = e^{x_{i1} z} \int S_{i-1} e^{-x_{i1} z} dz, \quad \varphi_i(z) = e^{x_{i2} z} \int S_{i-1} e^{-x_{i2} z} dz.$$

Условия (2) удовлетворяются при $c_{i2} = 0$ (так как $\kappa_{i2} > 0$) и

$$c_{i1} = S_{0i} - \frac{\alpha_{i-1}}{k_i(\kappa_{i2} - \kappa_{i1})} [\Phi_i(0) - \varphi_i(0)].$$

Нетрудно видеть, что при этом $\Phi_i(\infty) = \varphi_i(\infty) = 0$. Равенство нулю $\Phi_i(\infty)$ и $\varphi_i(\infty)$ определяется следующим. Исходный детрит S_0 практически не диффундирует ($k_0 = 0$) и в грунте нет его источников ($S_{0-1} = 0$). Тогда, согласно (1), (2) и характеристическому уравнению,

$$S_0 = A e^{\kappa_{01} z}, \quad (5)$$

где $A = S_{00}$, $\kappa_{01} = -\alpha_0 / V$. Из (4) и (5) следует, что $\Phi_i(z)$ и $\varphi_i(z)$ представляют собой суммы экспонент $e^{\kappa_{i1} z}$ с некоторыми коэффициентами, причем эти суммы стремятся к нулю при $z \rightarrow \infty$, так как $\kappa_{i1} < 0$.

Таким образом, общее решение цепочки уравнений (1) с граничными условиями (2) имеет вид

$$S_i = \frac{\alpha_{i-1}}{k_i(\kappa_{i2} - \kappa_{i1})} \{ [\Phi_i(z) - \Phi_i(0) e^{\kappa_{i1} z}] - [\varphi_i(z) - \varphi_i(0) e^{\kappa_{i1} z}] \} + S_{0i} e^{\kappa_{i1} z}. \quad (6)$$

Полученные решения описывают распределение в толще осадков исходного органического детрита, промежуточных и конечных продуктов его распада. В данной работе мы ограничимся анализом решения для первого промежуточного продукта и на его примере покажем закономерности распределения подобных компонентов в грунтовых растворах, а также факторы, определяющие эти закономерности.

Подставляя (5) в (6), получаем решение для первого продукта:

$$S_1 = - \frac{\alpha_0 A e^{\kappa_{01} z}}{k(\kappa_{01} - \kappa_{11})(\kappa_{01} - \kappa_{12})} + \left[S_{01} + \frac{\alpha_0 A}{k_1(\kappa_{01} - \kappa_{11})(\kappa_{01} - \kappa_{12})} \right] e^{\kappa_{11} z}. \quad (7)$$

Дифференцируя (7) по z и приравнявая производную нулю, находим глубину горизонта, на котором концентрация первого промежуточного продукта имеет экстремальное значение:

$$z = \frac{1}{\kappa_{01} - \kappa_{11}} \ln \frac{k_1 \kappa_{11} (\kappa_{01} - \kappa_{11})(\kappa_{01} - \kappa_{12})}{\alpha_0 A \kappa_{01}} \left[\frac{\alpha_0 A}{k_1 (\kappa_{01} - \kappa_{11})(\kappa_{01} - \kappa_{12})} + S_{01} \right]. \quad (8)$$

Если при этом соблюдается любое из трех условий:

I. $S_{01} < -F$, а) $\alpha_0 < D$, $\alpha_1 < B$ или

б) $\alpha_0 < C$, $\alpha_1 \geq B$;

II. $\alpha_0 > D$, $\alpha_1 < B$;

III. $\alpha_0 > C$, $\alpha_1 \geq B$,

где

$$B = \frac{V^2(A^2 - S_{01}^2)}{4k_1 S_{01}^2}, \quad C = \alpha_1 \left/ \left(\frac{A}{S_{01}} + \frac{V - \sqrt{V^2 + 4\alpha_1 k_1}}{2V} \right) \right.,$$

$$D = \sqrt{\frac{V^4}{4k_1^2} + \frac{\alpha_1 V^2}{k_1}} - \frac{V^2}{2k_1}, \quad F = \alpha_0 A \left/ \left(\frac{\alpha_0^2 k_1}{V^2} + \alpha_0 - \alpha_1 \right) \right.,$$

то величина S_1 имеет на данном горизонте максимум.

Если же выполняются условия

I'. $\alpha_0 = C$, $\alpha_1 > B$

или

II'. $S_{01} = -F$, $\alpha_0 < C$, $\alpha_1 > B$,

то максимум вырождается в наибольшее значение на границе раздела вода — грунт. Разрешив относительно V выражение для α_0 из двух последних условий, можно определить величины скорости осадконакопления, при

которых в поверхностном слое донных отложений имеют место наибольшие значения концентрации данного продукта распада.

Чтобы определить, как изменяется глубина залегания максимума в зависимости от скорости осадконакопления, нужно подставить в выражение (7) значения κ_{01} , κ_{11} и κ_{12} и найти, чему равны $\lim_{V \rightarrow 0} z$ и $\lim_{V \rightarrow \infty} z$. После раскры-

тия неопределенностей нетрудно убедиться, что с ростом скорости осадконакопления увеличивается и глубина, на которой наблюдается максимум.

Кратко суммируем выводы, вытекающие из исследования частного решения для первого промежуточного продукта.

1. Распределение первого промежуточного продукта в грунтовых растворах является функцией скорости осадконакопления, содержания органических остатков в грунте, констант распада твердого органического детрита и данного продукта, а также концентрации последнего на границе раздела воды — грунт и его коэффициента диффузии.

2. Существуют такие сочетания значений указанных параметров, при которых кривая вертикального распределения данного продукта в грунтовых растворах имеет максимум на некоторой глубине z .

3. Положение максимума существенным образом зависит от скорости осадконакопления. С ее увеличением возрастает и глубина залегания максимума. При малых темпах осадконакопления ($V \rightarrow 0$) максимум располагается в непосредственной близости от поверхности осадков.

4. При некоторых значениях скорости осадконакопления и соответствующих сочетаниях величин прочих параметров теоретически возможно вырождение максимума в наибольшее значение на границе раздела вода — грунт ($z = 0$).

Органическое вещество грунтовых растворов с достаточной степенью приближения можно рассматривать как первый промежуточный продукт распада, образующийся при частичном ферментативном гидролизе твердых органических остатков (²). Сопоставление следствий, вытекающих из анализа частного решения для данного продукта, с выводами качественного характера, сделанными Н. М. Страховым при изучении фактического распределения органического вещества в грунтовых растворах моря, показывает, что они не противоречат друг другу.

Таким образом, предлагаемое решение задачи для квазистационарных условий осадкообразования, представленное в аналитическом виде, позволяет количественно описать распределение в осадках исходного органического детрита и продуктов его распада, включая и конечные, как результат одновременного протекания процессов осадконакопления, распада и диффузии.

Лимнологический институт
Сибирского отделения Академии наук СССР
пос. Лиственничное Иркутской обл. на Байкале

Поступило
10 IX 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. М. Страхов, Основы теории литогенеза, 2, М., 1962. ² О. К. Бордовский, Накопление и преобразование органического вещества в морских осадках, М., 1964.