

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ И ОБМЕНА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ МОРСКИМИ ВОДОРОСЛЯМИ

Г.В. Баринов

Если в среду обитания гидробионта ввести изотоп какого-либо элемента, то через некоторое время между организмом и средой установится некоторое постоянное соотношение в распределении изотопа, которое количественно можно характеризовать выражением; аналогичным закону распределения вещества между двумя фазами [7, 10, 11]:

$$K_s = \frac{A_s}{A_c}, \quad /1/$$

- где A_s — активность изотопа в организме /на единицу веса/ при стационарном распределении изотопа;
 A_c — активность изотопа в среде /на единицу объема или веса/;
 K_s — стационарное значение коэффициента накопления /распределения/ изотопа.

Если гидробионт перенести из радиоактивной среды в "чистую" воду, то наблюдается процесс выведения изотопа. При достаточно большом объеме воды изотоп может полностью выводиться из гидробионта.

Переходя к вопросам кинетики, следует обратить внимание, что изотопный обмен в простых физико-химических системах описывается экспоненциальным законом. Согласно современным теоретическим представлениям действие экспоненциального закона в сложных неоднородных системах распространяется не на весь процесс в целом, а лишь на отдельные составляющие его простые /элементарные/ процессы. Кинетика изотопного обмена сложного процесса описывается иными закономерностями и опре-

деляется видом функции статистического распределения констант скоростей обмена или энергий активации /элементарных, однородных процессов/ [8, 9]. Кинетика обмена изотопов в биологических системах усложнена многофазностью, полидисперсностью структуры клеток, протоплазмы [5, 12, 2, 6, 14]. Проявление экспоненциального закона в биологическом эксперименте в основном наблюдается при изучении кинетики проницаемости и биохимических реакций в модельных опытах [13, 3, 4]. Учитывая принципиальную возможность действия экспоненциального закона в элементарных биохимических и биофизических процессах, связанных с проницаемостью, переносом и биохимическим превращением веществ, принимая во внимание структурную микротетерогенность протоплазмы и клеток, а также всеобщность и универсальность законов статистики, можно ожидать, что статическая теория усложненного изотопного обмена будет применима и к биологическим системам.

Методика постановки эксперимента и проведения
расчетов

Кинетика накопления и обмена изотопов изучалась с применением радиоактивных изотопов углерода, фосфора, рубидия, стронция, иода, марганца, иттрия, цезия и церия. Объектами исследования были бурая водоросль *Cystoseira barbata* и зеленая *Ulva rigida*. Выведение изотопа из организма наблюдалось параллельно с его накоплением, при этом время выведения бралось равным времени накопления. В случае выведения

$$\hat{K} = \frac{A - A_z}{A_z} , \quad /2/$$

где A_z - остаточная активность водоросли после пребывания ее в чистой воде.

Для нахождения эмпирических уравнений, описывающих кинетику процесса, подбирались соответствующие координаты, в которых данная функция преобразовывалась в линейную. Постоянные коэффициенты уравнений находились путем статистической обработки данных по методу наименьших квадратов. Затем функции накопления и выведения изотопов приравнивались друг к другу. Таким методом рассчитывались стационарные значения коэффициента накопления и времени обмена. Формулы расчета основных параметров обмена радиоизотопа и элемента в за-

в зависимости от вида функции обмена приведены в статье Баринова [1] и монографии Поликарпова [7]. Критерием правильности выбора эмпирической формулы служила степень совпадения расчетных величин с экспериментальными данными.

Экспериментальные данные и их обсуждение

В проведенных опытах по изучению накопления и обмена изотопов между водорослями и морской водой обнаружено, что, например, обмен кальция-45, а также цезия-137 и церия-144 у ульвы описывается степенной кинетикой /рис. 1/. Обмен кальция-45 у цистозиры подчиняется логарифмическому закону /рис. 2/. Различия в кинетике обмена,

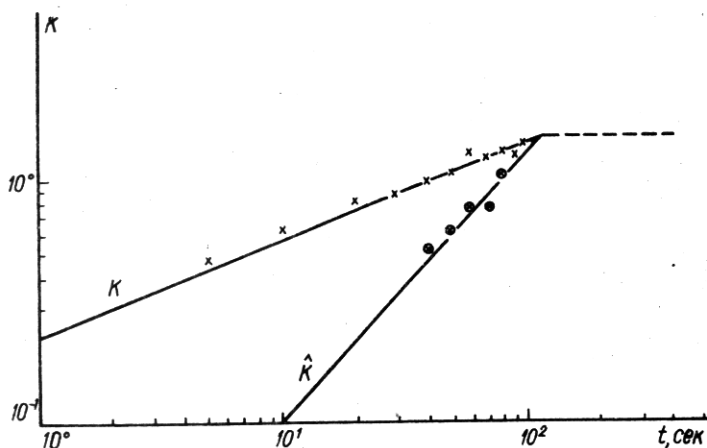


Рис. 1. Обмен Ca^{45} у ульвы.

по-видимому, зависят как от биологических особенностей объекта, так и биохимической роли элемента. Так, несмотря на близкие химические свойства кальция и стронция, кинетика обмена стронция-89 цистозирой подчиняется не логарифмическому, а более сложному степенно-логарифмическому закону /рис.3/. В убитых в кипящем спирте водорослях кальций и стронций обмениваются с такой же скоростью, как и в живых. По-видимому, обмен водорослями кальция и стронция и, возможно, некото-

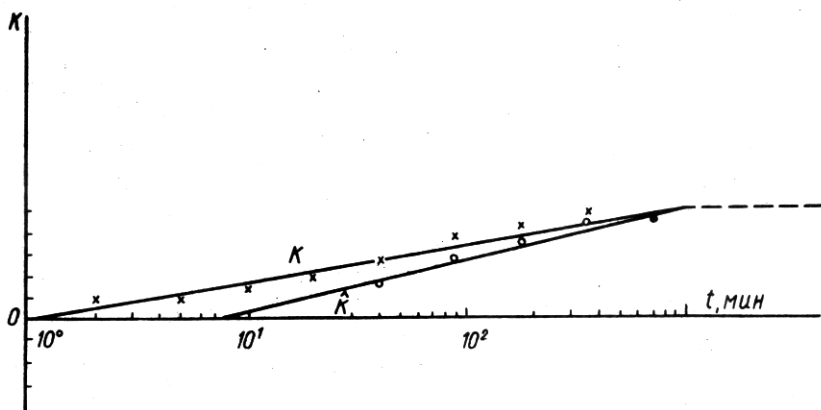


Рис. 2. Обмен Ca^{45} у цистозир.

рых других элементов является пассивным процессом и обусловлен физико-химическими механизмами диффузии и сорбции /неферментативный обмен/. Накопление радиоактивного углерода, фосфора, марганца, рубидия, иода наблюдается только в живых водорослях при участии ферментов. Кинетика ферментативного обмена описывается теми же функциями, что и неферментативного. Однако имеются и некоторые особенности. Одна из них состоит в том, что при обмене, обусловленном механизмами ферментативного катализа, выведение изотона происходит лишь около стационарного уровня, а не в любой момент времени, как в случае неферментативного обмена. Эффект отсутствия выведения изотона из водоросли в некоторый начальный отрезок времени обусловлен, по-видимому, необходимостью прохождения атомов через вершину обменного и энергетического цикла в системе последовательных биохимических реакций.

Если подходить к интерпретации кинетических уравнений с точки зрения статистической теории, то логарифмическую изотерму можно рассматривать как функцию равномерного распределения по константам скоростей, значениям энергии активации или свободной энергии реакции, а степенную изотерму, как функцию экспоненциального распределения аналогичных величин. Тогда более сложная степенно-логарифми-

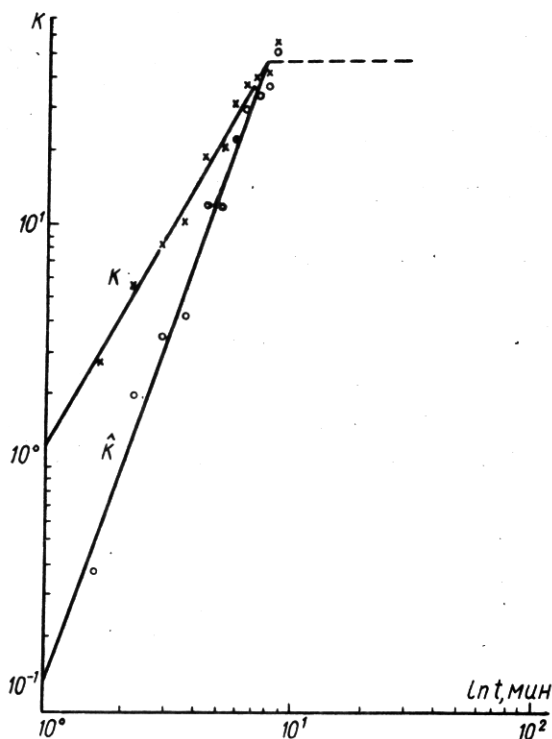


Рис. 3. Обмен Sr^{89} у цистозирн.

ческая изотерма будет результатом степенного распределения констант обмена, энергий активации или величин свободной энергии.

Общий вид кинетики обмена радиоизотопов представлен уравнением /3/

$$E = kT \ln t / \tau, \quad /3/$$

$$K(t) = \int_E f(E) dE,$$

где E - энергия активации;
 k - константа Больцмана;
 T - абсолютная температура.

Уравнение, аналогичное /3/, можно

вывести также, если рассматривать статистику распределения реагирующих атомов, молекул и радикалов по величинам их свободной энергии. Таким образом, если получено экспериментальное подтверждение применимости статистической теории изотопного обмена, то из этого следует: 1/ общий обменный фонд элемента неоднороден и состоит из ряда однородных микрофондов; 2/ кинетика изотопного обмена микрофондов описывается экспоненциальным законом, действие которого не распространяется на организмы в целом; 3/ так как кинетика обмена изотопов между организмом и средой зависит от статистики распределения констант или энергий реагирующих частиц, то она в принципе не может подчиняться только одному какому-либо закону.

В связи с принадлежностью организмов к открытым системам вполне очевидно, что между водорослями и морской водой происходит обмен не только радиоактивного изотопа, но и всего элемента. При установлении кинетического равновесия справедливо следующее соотношение:

$$K_s = \frac{C}{C_i} = \frac{A_s}{A_i}, \quad /4/$$

где C - концентрация элемента в организме;

C_s - концентрация элемента в среде.

Если в водоросли обменивается не весь элемент, а его часть, то правую часть равенства /4/ необходимо умножить на некоторую постоянную величину d , которая будет характеризовать степень обмена элемента. Тогда

$$d = \frac{C}{C_i} \cdot \frac{A_i}{A_s} = \frac{K_i}{K_s}. \quad /5/$$

Коэффициент d может изменяться от 0 до 1. При значении его, близком к 0, элемент практически в организме не обменивается, а при $d = 1$ обменивается на 100%.

Чтобы рассчитать коэффициент обмена элемента d , можно воспользоваться данными Виноградова /1953/. Произведенные расчеты показывают, что обмен кальция у ульвы равен примерно 7%, а у цистозиры 12%. Обмен стронция у ульвы близок к 100%, а у цистозиры равен примерно 37%.

Полученные кинетические закономерности изотопного обмена и производимые на их основе расчеты параметров обмена позволяют прогнозировать уровни и скорости радиоактивного загрязнения и самоочищения гидробионтов в зависимости от конкретной радиоэкологической ситуации. Так, при d , близком к 1, можно получить практически полное самоочищение гидробионта в неактивной среде за время, необходимое для достижения кинетического равновесия изотопного обмена t_s . При значениях d , близких к 0, и низких скоростях обмена изотопа гидробионт, временно попадая в радиоактивную среду, может почти не накопить радиоактивности. Но, если накопление радиоизотопа происходит с ранних этапов онтогенеза организма, то при низких значениях коэффициента и скорости обмена, самоочищения этого организма в неактивной среде, практически происходить не будет.

Если известна функция изотопного обмена, общая концентрация элемента в морских организмах, а также скорость и коэффициент обмена, то можно количественно характеризовать роль обменных процессов в биогеохимическом круговороте элемента в гидросфере. После проведения соответствующих расчетов получим, что, например, 1 г живой ульвы в течение одного года жизни обменивает кальция примерно в 8000 раз больше, чем его содержится в этой водоросли, а цистозира в 100 раз больше кальция и в 25 раз больше стронция, чем концентрирует этих элементов. Из приведенных примеров видно, насколько важно, рассматривая биогеохимический круговорот элемента в гидросфере, учитывать роль обменных процессов между средой и населяющими ее живыми организмами. По-видимому, в биогеохимическом круговороте обменные процессы для ряда элементов имеют гораздо большее значение, чем концентрирующая способность организмов.

В ы в о д ы

1. Показана применимость статистической теории усложненного изотопного обмена к гидробиологической системе и на основе этой теории предложен метод расчета основных параметров обмена радиоизотопов /коэффициента накопления, коэффициента обмена и др./.

2. Накопление радиоизотопа рассматривается как ветвь обменного и энергетического цикла элемента.

3. Полученные закономерности радиоизотопного обмена позволяют количественно учитывать роль обменных процессов в биогеохимическом круговороте элемента.

Л и т е р а т у р а

1. Баринов Г.В. - Гидробиол. журн., 1965, 1, 2.
2. Браше И. - Биохимическая цитология. ИЛ, М., 1960.
3. Брей Дж., Уайт К. Кинетика и термодинамика биологических процессов. ИЛ, М., 1959.
4. Диксон И., Уэбб Э. Ферменты. ИЛ, М., 1961.
5. Гейльбрунн Л. Динамика живой протоплазмы. ИЛ, М., 1957.
6. Ленинджер А. Митохондрия. Изд-во "Мир", М., 1966.
7. Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. Атомиздат, М., 1964.

8. Рогинский С.З. Адсорбция и катализ на неоднородных поверхностях. Изд-во АН СССР, М., 1956.
9. Рогинский С.З. Теоретические основы изотопных методов изучения химических реакций. Изд-во АН СССР, М., 1956.
10. Тимофеев-Ресовский Н.В. - Бот. журн., 1957, 42, 2.
11. Трошин А.С. Проблема проницаемости. Изд-во АН СССР, М.-Л., 1956.
12. Фернандес-Моран Г., Финсэн Д. Вопросы электронной микроскопии. ИЛ, М., 1959.
13. Ussing H. - *Physiol. Rev.*, 1949, 29, 127.
14. Kavanav I. Structure and function in biol. membranes. 1965.