

Микробное сообщество: определяющие свойства и закономерности в динамике и стационаре

Дегерменджи А.¹, Абакумов А.^{2*}

¹ Институт биофизики ФИЦ “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск, Россия

² Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

* abakumov@dvo.ru

Ключевые слова: хемостат; моделирование; управление структурой сообщества; эффект аутостабилизации; квантование коэффициентов

Мотивация и цель: В работе обобщены теоретические и экспериментальные исследования авторов, направленные на изучение закономерностей устойчивого сосуществования взаимодействующих микробных популяций в пределах одного трофического уровня. Популяции взаимодействуют в открытых непрерывных культурах посредством регулирующих факторов.

Методы и алгоритмы: В математических моделях микробных сообществ [1, 2] исследуются свойства динамики видового состава, изучаются закономерности и особенности устойчивого сосуществования популяций, взаимодействующих посредством регулирующих факторов (RF). Под регулирующими факторами понимаются субстраты и менее обычные биологические и физико-химические характеристики: метаболиты, ингибирующие рост; уровень pH среды; температура среды обитания и т. д.

Результаты: Анализ математических моделей смешанных микробных потоковых культур, взаимодействующих через RF, устанавливает правило: в равновесии число сосуществующих популяций не превышает числа RF, уровень входа которых контролирует состав сообщества. Регулирующие факторы демонстрируют эффект автостабилизации: их равновесные уровни в системе не связаны с их входными уровнями. Этот эффект обнаруживается через коэффициенты чувствительности. Закон для всего сообщества в идеальной однородной потоковой системе гласит, что сумма всех коэффициентов чувствительности представляет собой целое число, равное разности между числом RF и количеством сосуществующих популяций. В природных экосистемах с их изменяющимися условиями эффект автостабилизации проявляется в виде тенденции к отсутствию корреляции между фоновой концентрацией RF и численностью контролируемой популяции из-за обычного отсутствия данных о входных уровнях RF. Теоретические условия сосуществования видов достаточно сложны, а их реализация в природе сомнительна: в работах [3, 4] «хаотическое» состояние динамики популяций имитируется сложной комбинацией дискретных и случайных процессов. Для моделей, явно учитывающих RF, в самом общем случае для произвольных функций и типов взаимодействий строго доказан «принцип исключения»: даже динамическое сосуществование двух видов с одним RF любой природы невозможно [5].

Выводы: Эффект автостабилизации – это редкий пример теоретически точно выведенного инварианта или «закона экологии» для всей экосистемы, который был получен для сообщества с обширной и сложной сетью «зависимых от плотности»

взаимодействий. Используя на практике формулы квантования, мы можем оценить полноту наших знаний о системе взаимодействия популяций в сообществе в рамках достаточно общих предположений о «росте» и возрастной структуре каждой популяции. Результаты экспериментов позволяют непосредственно стремиться к поиску неучтенных типов питательных веществ или количества микроорганизмов по степени приближения к выполнению условия квантования. Регулирующие факторы демонстрируют эффект автостабилизации: их равновесные уровни в системе не связаны с их входными уровнями. В природных экосистемах с их изменяющимися условиями эффект автостабилизации проявляется в виде тенденции к отсутствию корреляции между фоновой концентрацией РФ и численностью контролируемой популяции.

Финансирование: Работа поддержана грантом РФФИ, № 23-44-00059, <https://rscf.ru/en/project/23-44-00059/>.

Microbial community: defining properties and patterns in dynamics and steady state

Degermendzhi A.¹, Abakumov A.^{2*}

¹ *Institute of Biophysics, Department of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk, Russia*

² *Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

* abakumov@dvo.ru

Key words: chemostat; modelling; control of community composition; autostabilization effect; coexistence; new interaction criterion

Motivation and Aim: The paper summarizes the authors' theoretical and experimental studies aimed at studying the patterns of sustainable coexistence of interacting microbial populations within the same trophic level. Populations interact in open continuous cultures through regulating factors.

Methods and Algorithms: The properties of the dynamics of species composition in mathematical models of microbial communities, and the patterns of sustainable coexistence of populations interacting through regulatory factors (RF) are studied [1, 2]. The regulatory factors are substrates and biological, physico, and chemical characteristics: growth-inhibiting metabolites; pH level of the environment; habitat temperature, etc.

Results: Analysis of mathematical models of mixed microbial flow cultures interacting through RFs establishes the rule: the number of coexisting populations in equilibrium does not exceed the number of RFs, the level of entry of which controls the composition of the community. Regulating factors exhibit an unexpected autostabilization effect: their equilibrium levels in the system are not related to their input levels. This effect is detected through sensitivity coefficients. The law for the entire community in an ideal homogeneous flow system states that the sum of all sensitivity coefficients is an integer. It is the difference between the number of RFs and the number of coexisting populations. In natural ecosystems with their changing conditions, the autostabilization effect will manifest itself as a tendency for there to be no correlation between background RF concentration and monitored population size. The theoretical conditions for the coexistence of species are quite complex, and their implementation in nature is questionable: in the

works [3, 4] “chaotic” coexistence of population dynamics is imitated by a complex combination of discrete and random processes. For models that explicitly consider RF, in the most general case, for arbitrary functions and types of interactions is strictly proven: even the dynamic coexistence of two species with one RF of any nature is impossible [5].

Conclusion: The autostabilization effect is an example of a theoretically rigorously derived invariant or “law of ecology” for an entire ecosystem that has been derived for a community with a vast and complex network of “density-dependent” interactions. Using quantization formulas in practice, we can assess the completeness of our knowledge about the system of populations interaction in a community within the framework of fairly general assumptions about the “growth” and age structure of each population. The results of the experiments allow us to directly strive to search for unaccounted types of nutrients or the number of microorganisms according to the degree of approximation to the fulfillment of the quantization condition. Regulating factors exhibit an unexpected autostabilization effect: their equilibrium levels in the system are not related to their input levels. In natural ecosystems with their changing conditions, the autostabilization effect will manifest itself in the form of a tendency towards a lack of correlation between the background RF concentration and the size of the controlled population.

Funding: The study was supported by Grant of the Russian Science Foundation No. 23-44-00059, <https://rscf.ru/en/project/23-44-00059/>.

Список литературы/References

1. MacArthur R. Species packing and competitive equilibrium for many species. *Theor Pop Biol.* 1970;1:1-11
2. Armstrong R.A., McGehee R. Coexistence of species competing for shared resources. *Theor Pop Biol.* 1976;9:317-328
3. Hutchinson G.E. The paradox of the plankton. *Am Nat.* 1961;95:137-145
4. Degermendzhi A.G. On the problem of coexistence of interacting continuous populations. In: Pechurkin N. (Ed.). Mixed continuous cultures of microorganisms. Novosibirsk: Nauka, 1981;26-106 (in Russian)
5. Degermendzhi A.G., Abakumov A.I. The Principle of Competitive Exception in a Two-Species Community with One Metabolic Regulation Factor. *Doklady Biochemistry and Biophysics.* 2018;480(1):149-151. doi 10.1134/S1607672918030055