



УДК 577.1:574

Современные проблемы физико-химической экологии

Ю. П. Козлов

Российский университет дружбы народов, Москва
E-mail: ecology-007@mail.ru

Аннотация. В обзоре рассмотрены основные направления современной физико-химической экологии: биофизическая, биохимическая и молекулярная экология. Представлены основные принципы системного анализа в экологии; проанализированы типы эколого-биохимических взаимодействий и функции экологических хемомедиаторов в биосфере; дан обзор роли свободнорадикального окисления в процессах химической ауторегуляции био- и экосистем.

Ключевые слова: физико-химическая экология, системология, экологические хемомедиаторы, ксенобиотики, свободно-радикальный баланс, антиоксиданты.

Физико-химическая экология – важный раздел *эндоэкологии*, включающий: *биофизическую экологию*, *биохимическую экологию* и *молекулярную экологию*.

Предметом *биофизической экологии* являются экологические основы организации, регулирования, термодинамики и динамики био- и экосистем. Методологической основой в этой области служит применение общесистемного подхода для выяснения обобщенных принципов взаимодействия основных структурных элементов из всей совокупности их отношений в био- и экосистеме с последующей реконструкцией на этой основе ее общих динамических свойств. Основными достижениями биофизической экологии в этом отношении может стать решение проблемы источника развития био- или экосистемы в виде концепции открытых систем, математическое моделирование ряда важнейших экологических процессов, разрешение кажущегося противоречия второму закону термодинамики в экологии. Поскольку био- и экосистемы – системы достаточно сложные, то к ним приложимы основные принципы системологии: а) иерархической организации (интегративных уровней по [8]), позволяющей соподчинить друг к другу любые системы (будь они естественные или искусственные); б) несовместимости [3]: сложность системы и точность, с которой ее можно анализировать, обратно взаимозависимы; в) контринтуитивного поведения [13]: прогноз поведения сложной системы нельзя оценить, опираясь только собственный опыт или интуицию; г) множественности моделей [7]: для предска-

зания структуры и поведения сложной системы возможно построение нескольких моделей, имеющих право на существование; д) осуществимости [12]: возможность дифференциации моделей сложных систем от обычных математических моделей; е) формирования законов: несоответствие между экспериментом и реальной сложной системой и законом, носящего, как правило, дедуктивный характер; ж) рекуррентного объяснения: для вывода свойств экосистемы постулируются свойства и связи популяций, для вывода свойств популяций – свойства особей и т. д.; з) минимаксного построения моделей: теория должна состоять из простых моделей систем нарастающей сложности. Серьезные трудности связаны с применением формальных понятий современной теории информации в биофизической экологии. Разработка объективных характеристик понятия ценности информации – вполне самостоятельная задача современной теории информации, решение которой может быть связано, в т. ч. и с изучением особенностей проявления всех жизненных связей в биосфере. Так, в теле человека содержится более 10^{14} клеток, а каждая клетка перерабатывает порядка 10^8 бит/с, что совпадает со скоростью переработки информации современным персональным компьютером. В биосфере же содержится около 10^{28} живых клеток, которые, следовательно, перерабатывают поток информации порядка 10^{36} бит/с, что на 20 порядков больше информационных потоков во всех компьютерах современной цивилизации. В противоположность взаимодействию компьютера и человека в естест-

венной биоте (так же, как и в организме человека) молекулярные ячейки памяти в клетке совмещены с элементами взаимодействия с окружающей клетку средой. Поэтому весь поток информации, перерабатываемой биотой, непосредственно используется при ее взаимодействии с окружающей средой. Из этих оценок вытекает, что ни на каких современных компьютерах нельзя смоделировать работу живого организма и тем более функционирование биоты биосферы [9].

Вторым разделом физико-химической экологии является *биохимическая экология*, изучающая роль и функции экологических хемомедиаторов в биосфере [2; 11]. Их значение огромно при взаимодействии организмов как внутри популяции, так и для формирования межорганизменных связей и устойчивости экосистем. Можно выделить три типа таких взаимодействий: 1) невозможные в природных условиях, «запрещенные» трофические связи, которые не реализуются в потоках энергии в природных экосистемах в силу наличия токсинов или других действующих соединений; 2) широкий класс достаточно обычных трофических взаимодействий; 3) тип связей, при которых вид-консумент получает не только пищевые субстраты, но и жизненно необходимые соединения, названные «хемомедиаторами». Эколого-биологические взаимодействия и участвующие в них вещества играют большую роль в формировании структуры энергетического и вещественного потока через те или иные экосистемы. При этом важный вопрос – разделение потока энергии и вещества на пастбищные и детритные трофические цепи. Для подобного разделения существенны две группы эколого-биохимических взаимодействий: 1) взаимодействия между высшими растениями и грибами, в которых участвуют токсины, ферменты грибов и патогенных бактерий, пре- и постинфекционные соединения растений; 2) взаимодействия между высшими растениями и фитофагами, в которых участвуют токсины растений, репелленты, антифиданты, аттрактанты; факторы, влияющие на плодовитость и онтогенез фитофагов, и другие экологические хемозффекторы. Соотношение эффективности действия этих двух групп экологических хеморегуляторов, в конечном счете, регулирует, какая доля энергии вещества, запасенных в первичной продукции, далее пойдет по детритному или пастбищному пути, определяющих, в немалой степени, структуру и облик экосистемы.

С экологической точки зрения, можно выделить ряд главных функций химических веществ, участвующих в нетрофических взаимодействиях.

Одна из них – защита от потенциального хищника, паразита и вообще консумента: его отпугивание, устранение, сдерживание его пищевой или репродуктивной активности или запрет поедания данного вида – потенциального объекта потребления. Воздействие таких защитных веществ направлено вверх по потенциальным трофическим цепям. Подобным образом действуют многие токсические или репеллентные вещества растений, другие вещества с гормональным действием, а также «оборонительные» экскреты и токсины беспозвоночных, т. е. обладающие функцией защиты оборонительного оружия.

Другая функция – свойство наступательного биохимического оружия, проявляющаяся у веществ организмов высшего трофического уровня во взаимодействиях с нижшим трофическим уровнем. Таковы токсины и эоферменты паразитических грибов, патогенных бактерий, а также токсины хищных животных. Взаимодействие подобных веществ направлены по трофической цепи вниз, на организм нижнего трофического уровня.

Третья функция – сдерживание конкурентов того же самого трофического уровня. Эта функция может быть одновременно и оборонительной, и наступательной, присуща как нижшим растениям (например, фитопланктону), так и высшим растениям. Подобная функция обнаруживается и у животных, например в случае мечения индивидуального участка пахнущими веществами. Такой функцией могут обладать и пестициды, вносимые человеком в агроэкосистемы, для «борьбы» с паразитами растений (грибами, бактериями).

Четвертая функция – привлечение, приманивание, роль сигнала, действующего как призывный фактор (аттрактанты того или иного рода). Подобные сигналы часто стимулируют пищевую, двигательную или репродуктивную активность. Эта функция проявляется во взаимодействии с организмами различных трофических уровней. К ним можно отнести эохемомедиаторы различного типа: 1) многочисленные половые феромоны и аттрактанты, обнаруженные у грибов, растений и животных; 2) пищевые аттрактанты растений, воздействующих на животных-фитофагов; 3) аттрактанты растений, привлекающие животных-опылителей; 4) вещества (кайромоны), выде-

ляемые животными-жертвами и используемые хищниками и паразитами для обнаружения жертв и ориентировки при их поиске.

Пятая функция – регуляция взаимодействия внутри популяций, группы особей или семьи. Она свойственна многим веществам, обнаруженным у позвоночных и регулирующим их поведение и репродуктивную активность. Такие вещества играют ключевую роль в поддержании сложной структуры и ее функционирования в колониях общественных насекомых.

Шестая функция – снабжение организмов, воспринимающих данные вещества, необходимыми молекулами-полуфабрикатами, из которых создаются гормоны или феромоны, или молекулами, которые используются воспринимающим организмом в готовом виде.

Седьмая функция – участие в формировании среды обитания. Такими функциями могут обладать выделяемые гидробионтами компоненты растворимого органического вещества. Можно полагать, что данная функция экзотаболитов существенна и в почвенном блоке экосистем.

Восьмая функция – индикация подходящих для заселения, колонизации или размножения местообитаний, ориентация в пространстве и формировании предпочтений при поиске местообитаний. Последняя характерна для всех подвижных организмов.

Поэтому биохимическую экологию можно охарактеризовать как область науки о биохимической стабилизации и дестабилизации экологического равновесия.

Третьим разделом физико-химической экологии является *молекулярная экология*. В ее основе лежат исследования процессов, обуславливающих современное состояние биосферы и связанных с химическими превращениями веществ; процессов в окружающей среде с учетом влияния антропогенных воздействий на биотические и абиотические компоненты экосистем. Это направление рассматривает, как правило, химическое загрязнение окружающей природной среды, дает характеристику основных химических загрязнителей и способов определения уровня загрязнения, разрабатывает физико-химические методы борьбы с подобным загрязнением, проводит изыскание новых экологически чистых источников энергии и т. д. [1; 6; 10].

Все большее значение в связи с широко-масштабным химическим загрязнением окружающей природной среды приобретают исследования механизмов детоксикации и биодеграда-

ции чужеродных веществ (поллютантов, ксенобиотиков). Существенно при этом, что химическое загрязнение среды может нарушать естественные коммуникативные связи между организмами.

Накопилось достаточное количество данных о том, что в формировании среды обитания таких организмов принимают участие не просто химические медиаторы, а активные формы молекул, находящихся в свободно-радикальном состоянии (так называемые «свободные радикалы» – атомы или осколки молекул неорганической или органической природы, обладающие огромной реакционной способностью и этим самым влияющие как на протекание обменных процессов в живых клетках организма, так и в отдельных экосистемах). Различным организмам (биосистемам) или экосистемам присущ разный стационарный уровень концентрации свободных радикалов (отражающих разную степень интенсивности протекания окислительных свободно-радикальных реакций), регулируемый другой системой – антиокислительной (молекулами-антиоксидантами).

Для разных типов морских беспозвоночных показано, что при изменении солености среды происходит повышенный расход антиоксидантов и развитие окислительных свободно-радикальных перекисных реакций в липидной фазе клеток организмов. Организмы, неустойчивые к опреснению (морские ежи, морские звезды) в результате быстрого израсходования антиоксидантов и резкого возрастания окислительных радикальных реакций при изменении солености быстро погибали. Наоборот, у организмов более устойчивых к опреснению (актинии, балянусы) этот процесс протекал более медленно. Различная степень эвригалинности морских организмов оказалась тесно связанной с мощностью антиокислительных систем липидной природы.

Сравнительное изучение организмов с различной способностью выдерживать опреснение и переходить из моря в реки показало, что у организмов, способных осуществлять такой переход (проходные рыбы), мощная антиокислительная система, не дающая развиваться «разрушительным» окислительным реакциям.

Показано, что органические соединения – антиоксиданты и пероксид водорода имеют большое значение для формирования окислительно-восстановительных условий в природной воде. Эти условия, а также уровень концентрации свободных радикалов заметно воз-

действует на состояние обитающих в водных экосистемах организмов (само же воздействие выделяемых гидробионтами названных веществ в данном случае направлено во все стороны экологической пирамиды при рассмотрении межорганизменных трофических связей), а также на скорость окислительного разрушения растворимых естественных и загрязняющих водоем органических веществ. Похожая функция экзометаболитов существенна, вероятно, и в почвенном блоке экосистем [4].

Долгосрочная адаптация живого организма к меняющимся условиям среды в результате действия физических или химических факторов сопровождается возникновением «системного структурного следа», устранение которого после прекращения действия побудительного стимула открывает дорогу для создания новых структурных следов и, следовательно, получения новых адаптационных возможностей. Отсюда, вполне очевидна важность механизмов, осуществляющих «стирание» структурного следа, т. е. разборку синтезированных *de novo* структур, участвующих в адаптации. Характерным примером возникновения и устранения структурного следа является индукция мембран эндоплазматического ретикулаума печени организмов и локализованной в них системы оксигеназ со смешанной функцией при попадании в организм чужеродных веществ и последующая разборка индуцированных структур. Принимая во внимание, что процесс свободно-радикального перекисного окисления липидов является эффективным инструментом дезинтеграции биологических мембран клеток, было показано, что этот процесс является важным звеном механизма разрушения структурного следа в печени организмов – органе детоксикации поллютантов среды.

При действии разных по природе внешних факторов на организм в его тканях происходит нарушение характерного для интактных клеток стационарного уровня концентрации свободных радикалов, которое в определенных пределах подвержено аутостабилизации со стороны организма за счет накопления ингибиторов окисления (антиоксидантов), а при более значительных воздействиях приводит к необратимому поражению и гибели организма, в основном, в результате интенсификации деструктивных окислительных процессов. Переходы от одного стационарного уровня концентрации свободных радикалов к другому в клетках происходит в определенных пределах скоростей

реакций по кривым, носящим экстремальный характер [5].

Свободно-радикальный баланс (отношение концентрации свободно-радикальных состояний к количеству антиоксидантов в системе) существенно изменяется при различных физиологических воздействиях и патологических состояниях организма: Е-авитаминоз, ишемия и реоксигенация конечностей, эмоционально-болевого стресс, злокачественный рост, гематологические заболевания, лучевое поражение, интоксикация биологически активными веществами и т. д. Выявленные изменения антиокислительных систем в тканях больных были антибатны по отношению к развитию свободно-радикального окисления субстратов при тех же заболеваниях. Этим, по своей сути, иллюстрируются авторегуляторные механизмы ответных реакций организма на молекулярном уровне. А сама авторегуляция как защитная реакция организма, по всей видимости, осуществляется изменением концентрации тканевых антиокислителей, регулирующих концентрацию продуктов свободно-радикального окисления, и в этом смысле этот механизм можно трактовать по теории адаптационного синдрома.

С целью повышения адаптивных способностей организма и предупреждения вредных последствий действия на организм различных факторов среды все шире применяются фармакологические средства, среди которых заметное место занимают химические соединения, обладающие антиокислительным действием. В первую очередь, это относится к витаминам – антиоксидантам (альфа-токоферол, аскорбиновая кислота и др.).

Таким образом, рассмотренные примеры демонстрируют несомненную роль свободно-радикального баланса как «химического регулятора» в био- и экосистемах.

Литература

1. Барбье М. Введение в химическую экологию / М. Барбье. – М. : Мир, 1978. – 167 с.
2. Богдановский Г. А. Химическая экология / Г. А. Богдановский. – М. : МГУ, 1994. – 238 с.
3. Заде Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л. А. Заде // Математика сегодня. – М. : Знание, 1974. – С. 5–49.
4. Козлов Ю. П. Роль свободных радикалов в биосфере / Ю. П. Козлов // Вестник РУДН : Сер. Экология и БЖ. – 2001. – № 7. – С. 13–17.

5. Козлов Ю. П. Свободные радикалы и их роль в нормальных и патологических процессах / Ю. П. Козлов. – М. : МГУ, 1973. – 264 с.
6. Козлов Ю. П. Химическая экология / Ю. П. Козлов // Вест. РУДН : Сер. Экология и БЖ, 1999. – № 3. – С. 5–9.
7. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М. : Наука, 1971. – 208 с.
8. Одум Ю. Экология : в 2 т. / Ю. Одум ; пер. с англ. Ю. М. Фролова ; под ред. В. Е. Соколова. – М. : Мир, 1986. – Т. 1. – 328 с. ; Т. 2. – 376 с.
9. Реймерс Н. Ф. Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы / Н. Ф. Реймерс. – М. : Россия молодая, 1994. – 366 с.
10. Скурлатов Ю. И. Введение в экологическую химию : учеб. пособие / Ю. И. Скурлатов, Г. Г. Дука. – М. : Высш. шк., 1994. – 399 с.
11. Телитченко М. М. Введение в проблемы биохимической экологии / М. М. Телитченко, С. А. Остроумов. – М. : Наука, 1990. – 256 с.
12. Флейшман Б. С. Основы системологии / Б. С. Флейшман. – М. : Радио и связь, 1982. – 368 с.
13. Форрестер Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М. : Наука, 1978. – 168 с.

Modern problems of physical and chemical ecology

Yu. P. Kozlov

Russian University of Friendship of the Peoples
Russian Ecological Society

Abstract. In the review the basic directions of modern physical and chemical ecology are considered: biophysical, biochemical and molecular ecology. Main principles of the system analysis for ecology are presented; types of ekologo-biochemical interactions and function ecological chemomediators in biosphere are analysed; the role of free-radical oxidations in processes chemical autoregulation of bio- and ecosystems is given.

Key words: physical and chemical ecology, ecological chemomediators, xenobiotic, free-radical balance, antioxidants.

*Козлов Юрий Павлович
Российский университет дружбы народов
113093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5
доктор биологических наук, профессор
заведующий кафедрой системной
экологии экологического факультета
тел./факс (495) 952–89–01*

*Kozlov Yuri Pavlovitch
Russian University of Friendship of the Peoples
113093, Moscow, 8/5, Podolskoe Road
D. Sc. in Biology, Prof.,
Head of Department of System Ecology
phone/fax: (495) 952–89–01*