

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 615.099-056.2

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КАТЕГОРИИ ЭКОТОКСИКОЛОГИИ**Иванов М.Б.***ООО «Научно-производственный центр Энзим», Санкт-Петербург,
e-mail: maybenivamp@gmail.com*

Цель исследования – провести анализ, актуализацию и дополнение основных терминов, понятий и направлений экотоксикологии как неотъемлемой составной части токсикологии – фундаментальной дисциплины, в рамках которой исследуются этиологические и патогенетические особенности форм и проявлений токсических процессов. Проанализировано более 170 источников литературы по проблеме, опубликованных за период с 1980 по 2024 г., из них 26 источников цитируются в тексте статьи. Установлено, что основные концепции токсикологии и ее составляющей экотоксикологии как научной и практической области подлежат уточнению и расширению. Экотоксикология охватывает изучение специфических форм и проявлений токсичности на всех уровнях структурно-функциональной организации живых систем, включая популяции и биосферу в целом. Выделяется отдельная область, занимающаяся исследованием структуры и характеристик экологического профиля, который формируется под воздействием экополлютантов. В рамках статьи рассматриваются ключевые термины и основные категории, имеющие фундаментальное значение для экотоксикологии. Получает дальнейшее развитие учение о токсическом процессе, углубляется представление о его формах и проявлениях. Формулируется определение и описываются характеристики токсических процессов в биосфере (омниэкоотоксические). Выделяются и описываются особая форма токсического процесса и ее проявления на уровне биосферы. В заключение приводятся выводы о том, что насущным является расширение понятия о проявлениях токсического действия на всех уровнях организации жизни, в том числе организма (аутэкоотоксические); популяции (демэкоотоксические); биогеоценоза (синэкоотоксические). Кроме того, необходимым представляется дальнейшее совершенствование методологии исследования и описания соответствующими количественными и качественными характеристиками уникального поллютантного профиля среды. Обоснованным можно считать, исходя из современных знаний, конкретизацию понятия ксенобиотик. Требуется выделение и дальнейшее всестороннее описание особой формы токсического процесса и ее проявлений на уровне биосферы. Закономерным становится формулирование определения и описание характеристик токсических процессов в биосфере (омниэкоотоксические).

Ключевые слова: экотоксикология, популяции, биосфера, биогеоценозы, поллютанты, ксенобиотики, токсический процесс

FUNDAMENTAL CATEGORIES OF ECOTOXICOLOGY**Ivanov M.B.***LLC Scientific and Production Center Enzyme, Saint Petersburg,
e-mail: maybenivamp@gmail.com*

Objective: to analyze, update and supplement the basic terms, concepts and areas of ecotoxicology as an integral part of toxicology - a fundamental discipline that studies the etiological and pathogenetic features of the forms and manifestations of toxic processes. More than one hundred and seventy literature sources on the problem were analyzed for the publication period from 1980 to 2024, twenty-six of which are cited in the text of the article. It was established that the basic concepts of toxicology and its component ecotoxicology as a scientific and practical field are subject to clarification and expansion. Ecotoxicology covers the study of specific forms and manifestations of toxicity at all levels of the structural and functional organization of living systems, including populations and the biosphere as a whole. A separate area is distinguished that studies the structure and characteristics of the ecological profile, which is formed under the influence of ecopollutants. The article considers the key terms and main categories of fundamental importance for ecotoxicology. The study of the toxic process is further developed, the understanding of its forms and manifestations is deepened. The definition is formulated and the characteristics of toxic processes in the biosphere (omnietoxic) are described. A special form of the toxic process and its manifestations at the level of the biosphere are identified and described. In conclusion, the conclusions are made that it is urgent to expand the concept of manifestations of toxic action at all levels of life organization, including: the organism (autecotoxic); population (demecotoxic); biogeocenosis (synecotoxic). In addition, it seems necessary to further improve the methodology of research and description of the unique pollutant profile of the environment with the corresponding quantitative and qualitative characteristics. Based on modern knowledge, it is possible to consider the specification of the concept of xenobiotic justified. It is necessary to identify and further comprehensively describe a special form of the toxic process and its manifestations at the level of the biosphere. It becomes natural to formulate a definition and describe the characteristics of toxic processes in the biosphere (omnietoxic).

Keywords: ecotoxicology, populations, biosphere, biogeocenoses, pollutants, xenobiotics, toxic process

Введение

В настоящее время одним из ключевых направлений в токсикологии является исследование токсических процессов на уровне популяции. Важно отметить, что разно-

образие форм и проявлений токсических процессов, начиная с молекулярного и субклеточного уровней и заканчивая уровнем организма, составляет основу для их проявлений в популяции. Эти процессы могут

приводить к следующим последствиям: гибели популяции, изменению структуры и уровня заболеваемости, росту смертности, увеличению числа врожденных дефектов, снижению рождаемости; нарушению демографических характеристик (соотношение возрастов, полов, социальных групп и т.д.); сокращению средней продолжительности жизни, ухудшению качества жизни, возникновению социальных конфликтов и культурной деградации среди членов популяции [1, с. 374–389; 2, с.105–118; 3]. Тем не менее формы и проявления токсических процессов на более высоких уровнях организации жизни остаются недостаточно изученными в научной среде.

Цель исследования – провести анализ, актуализацию и дополнение основных терминов, понятий и направлений экотоксикологии как неотъемлемой составной части токсикологии – фундаментальной дисциплины, в рамках которой исследуются этиологические и патогенетические особенности форм и проявлений токсических процессов на всех уровнях организации живой материи.

Материалы и методы исследования

Проанализированы научные статьи, монографии, учебники, опубликованные в открытой печати, в том числе в электронных версиях. Поиск осуществлен по базам данных eLibrary, PubMed, Scopus, Web of Science. Кроме того, был проведен поиск по ключевым словам с помощью поисковых систем Google и Яндекс. Вследствие характера и специфики исследованной тематики в работу отбирались научные литературные источники проблеме в основном за период с 1980 по 2024 г. Было рассмотрено более 170 источников литературы, из них 26 цитируются в тексте статьи. Предложены и обоснованы фундаментальные категории ныне существующих мировоззренческих и терминологических проблем экотоксикологии.

Результаты исследования и их обсуждение

Токсические влияния веществ, замечаемые на популяционном и биогеоэкологическом уровнях, стали привычно обозначаться как экотоксические. В результате этого возникла тенденция применять термин экотоксикология для описания совокупности знаний о воздействиях физиологически активных веществ (включая токсины и активные фармацевтические соединения как поллютанты) на экосистемы, при этом игнорируя человека [4; 5; 6, с. 115–173]. Исключив человека из перечня объектов, которые рассматриваются экоток-

сикологией, данное определение проводит четкое разграничение между экотоксикологией и токсикологией окружающей среды. Под термином токсикология окружающей среды подразумевается изучение непосредственного воздействия поллютантов на человека. Однако следует отметить, что человечество представляет собой неотъемлемую и важную часть биосферы, включая ее влияние на экологические процессы. Кроме этого, токсикология окружающей среды опирается на уже сложившиеся категории и концепции классической токсикологии, а также обычно применяет традиционные методы экспериментальных, клинических и эпидемиологических исследований.

Таким образом, вынуждены констатировать, что автор не разделяет такой подход к умножению сущностей, и следует заметить, что никаких методологических различий между экотоксикологией и токсикологией окружающей среды нет, это тем более очевидно при оценке опосредованного действия поллютантов на человеческие популяции (например, обусловленное токсической модификацией биоты), или, напротив, выявить механизмы действия токсикантов, находящихся в среде, на представителей того или иного отдельного вида живых существ. В этой связи подчеркнем, что токсикология окружающей среды может рассматриваться только как узкая ветвь экотоксикологии, а следовательно, и токсикологии в целом.

Экотоксикологию определенно можно рассматривать как научно-практическую составную часть фундаментальной дисциплины, в рамках которой исследуются кинетические и динамические процессы, происходящие с поллютантами, в том числе с ксенобиотиками в надорганизменных живых системах, нарушение в них гомеостаза, этиопатогенетические звенья токсических процессов и их проявления. Это изучение охватывает как популяционные, так и другие экосистемные уровни воздействия [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 4]. Таким образом, содержанием и основным смыслом раздела токсикологии, именуемого экотоксикологией, является развитие учения об особой форме и проявлениях токсического процесса на уровнях от популяции и до биосферы, с тремя основными и относительно самостоятельными разделами: экотоксикометрией, экотоксикокинетикой и экотоксикодинамикой – и отдельным разделом, в рамках которого изучаются характеристики формируемого экополлютантами профиля среды (часто встречается термин «ксенобиотический» профиль среды) [1, с. 374–389; 7; 8]. Исходя из этих положений, при действии комплекса природных и антропогенных

(техногенных) факторов на геохимическом фоне, из множества частных поллютантных характеристик (показателей) происходит синтез и кристаллизация динамической системы [9–11], оформленной под их воздействием и описываемой соответствующими количественными и качественными характеристиками уникального поллютантного профиля среды.

Индивидуальные поллютантные профили природной среды, характерные для конкретного региона, формировались, как правило, применительно к конкретной территориальной части планеты в ходе широкого спектра длительных геохимических и биогеохимических эволюционных процессов, протекавших на Земле, принято условно называть естественными. Соответственно, формирование, адаптация и развитие биоценозов в этих регионах, как правило, в той или иной степени происходило в тесном взаимовлиянии с соответствующими условиями окружающей среды и конгруэнтности с ней [2, с. 105–118; 4; 11].

На сегодняшний день экстенсивная и продуктивная деятельность человеческой цивилизации распространилась практически на все географически определенные части планеты и простирается на весь объем и протяженность биосферы. По своим интенсивности и масштабам она уже сопоставима с воздействием глобальных природных процессов космического уровня. Уровень и направленность глобальных процессов биосферных изменений, мы надеемся, все еще не приобрели необратимый характер и в полной мере зависят от решений и действий человеческого общества [6, с. 115–173; 12; 13]. Критическое смещение характеристик поллютантного профиля среды, приводящее к его качественному преобразованию, является, как правило, следствием сверхпереносимой концентрации загрязнителя в поступивший объем одного или нескольких компартментов биогеоценоза. Однако даже в этом случае лишь те загрязняющие вещества, которые достигли уровня, способного инициировать токсические реакции в биологических системах или их генерациях, могут классифицироваться как экотоксиканты [1, с. 374–389; 2, с. 105–118].

В данном контексте одной из нерешенных методологических проблем и прикладных задач современного этапа развития экотоксикологии и токсикологии в целом является определение качественных характеристик и количественных параметров, которые позволяют с достаточной долей достоверности констатировать, в какой момент и на какой стадии кинетических и/или динамических процессов экополлютант трансформируется

в экотоксикант. При этом следует направить усилия в сторону совершенствования методологии и конкретных научно-методических приемов по установлению токсикометрических характеристик причинно-следственных связей между фактом индикации поллютанта в окружающей среде, поступлением токсиканта в биологическую систему, его воздействием на нее и развитием характерных, специфических форм и проявлений токсического процесса в биологических системах, составляющих популяцию, биогеоценоз и биосферу [1, с. 374–389; 14; 15].

Таким образом, экотоксикометрия – наименее развитое в настоящее время направление и раздел экотоксикологии, в рамках которого разрабатываются, обосновываются, отрабатываются и совершенствуются как методологические направления, так и частные методические приемы, позволяющие с достаточной степенью достоверности доказательной базы выносить суждение (перспективно или ретроспективно) об экотоксичности поллютантов. При этом следует особо подчеркнуть тот факт, что важнейшей экотоксикометрической характеристикой загрязнителей является оцениваемая степень их экотоксической опасности. Принято считать, что наибольшую потенциальную опасность для биологических систем представляют экополлютанты, в силу их физико-химических свойств и свойств окружающих их биотических и абиотических факторов, способные длительно персистировать в окружающей среде и организмах и являющиеся ведущими этиологическими и патогенетическими факторами болезней химической этиологии, аллобиотических состояний и специальных форм токсического процесса [1, с. 374–389; 15; 16].

Экотоксикокинетика – раздел экотоксикологии, в рамках которого изучается судьба экополлютантов в условиях сформировавшегося, формирующегося или меняющегося поллютантного профиля среды, включая выяснение: источников появления токсикантов (поллютантов, в том числе обладающих признаками ксенобиотиков) в объектах окружающей среды; путей, молекулярных механизмов их поступления в биологические системы путем преодоления биологических и пространственно-временных барьеров; закономерностей распределения, фиксации в абиотических и биотических элементах окружающей среды и способов межэлементной циркуляции; реакций и характеристик биотрансформации в биологических системах, межсистемных коммуникациях и в среде обитания и окружающей среде; и выведения (элиминации) из нее [1, с. 374–389; 17; 18, с. 18, 243].

Важно отметить, что ключевым аспектом экотоксикологического анализа поллютантов выступает выявление их источников. В настоящее время основные источники загрязнения принято разделять на природные (естественные загрязнители как абиотического, так и биотического происхождения, к которым относят извержения вулканов, лесные и степные пожары, минеральную и органическую пыль, пыльцу растений, продукты жизнедеятельности бактерий и грибов, выделения растений, животных и человека, парниковые газы и др.) и искусственные (антропогенные/техногенные), среди которых выделяют: транспортные; производственные; бытовые [6, с. 115–173; 9; 10]. Однако порой с достаточной точностью идентифицировать источник загрязнения или достаточно сложно, или не представляется возможным в связи с тем, что экотоксикант поступает в среду в короткие временные промежутки и в количествах, не поддающихся индикации имеющимися в распоряжении методами в данной среде, а иногда загрязнитель поступает в среду как примесь к безвредной или даже полезной субстанции или маскируется многокомпонентным составом продукта. Кроме того, описана возможность образования экополлютанта (экотоксиканта) в окружающей среде в результате изолированных или комплексных абиотических или биотических трансформаций, в том числе трансгенерационных переносов и превращений [10, 12, 19].

Имеющиеся в наличии у надорганизменных форм организации живой материи эволюционно выработанные адаптационно-приспособительные механизмы зачастую позволяют эффективно справляться с поступлением экополлютантов в среду; так, в арсенале биосферы присутствуют множества биотических и абиотических элементов, включенных в процессы, направленные на физико-химические превращения токсиканта в форму, приемлемую для его успешной элиминации (удаления) из системы. Тем не менее если поллютант обладает набором характеристик, позволяющих ему не только проникать в экосистемы, но и не подвергаться ингибирующему действию процессов трансформации или трансформация которого влечет за собой усиление его реакционной способности (токсичности), то вследствие такого стечения обстоятельств токсикант способен либо длительно персистировать в окружающей среде, оказывая на ее компоненты негативное влияние, либо наносить некомпенсируемые повреждения системе, такие загрязнители, как правило, являются потенциально опас-

ными экотоксикантами. Так, не вызывает сомнения тот факт, что постоянный, превышающий лимиты системы вброс в элементы среды обитания или окружающую среду длительно персистирующих поллютантов, как правило, приводит к их аккумуляции в структурах биогеоценоза, кумулятивным эффектам и некомпенсируемым повреждениям в гомеостатических механизмах наиболее уязвимого (чувствительного) звена биосистемы и, как следствие, развитию токсического процесса. Таким образом, даже если поступление устойчивого токсиканта в окружающую среду полностью прекращается, он может оставаться там на протяжении длительного времени и продолжать проявлять свои экотоксические свойства [2, с. 105–118; 17, 20]. Снижение выбросов персистирующих загрязняющих веществ требует интеграции экологически чистых технологий и методов в промышленности и сельском хозяйстве. Внедрение устойчивых практик, таких как циркулярная экономика и использование возобновляемых ресурсов, может значительно уменьшить количество токсикантов, попадающих в экосистемы. Особенно важно сотрудничество между государственными органами, учеными и бизнесом для разработки эффективных стратегий управления. При этом образование и осведомленность населения также играют ключевую роль в борьбе с экологическими угрозами. Повышение знаний о воздействии токсикантов на здоровье человека и окружающую среду может способствовать более осознанному поведению и уменьшению потребления опасных веществ.

Абиотическое разложение химических веществ, как правило, протекает медленно и требует значительного времени для полного разложения загрязняющих веществ. Однако, когда в дело вступают живые организмы, особенно микроорганизмы, такие как бактерии и грибы, скорость трансформации значительно увеличивается, при этом биота зачастую играет ключевую роль в превращениях загрязняющих веществ, включая ксенобиотики. Микроорганизмы способны использовать ксенобиотики в качестве источника энергии и пластических материалов, что позволяет им адаптироваться к изменяющимся экологическим условиям [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 9]. Однако зачастую участие биоты в трансформации поллютантов и включение у нее в ответ на взаимодействие с загрязнителем типовых защитно-приспособительных реакций может стать пусковым звеном в инициации цепи негативных процессов и сопровождаться развитием форм и проявлений токсического процесса на субклеточ-

ном, клеточном, организменном и популяционном уровне в биологических системах, участвующих в биотрансформации, в том числе с выходом в среду физиологически активных веществ, например антибиотиков. Что, в свою очередь, запускает формы и проявления токсических процессов в других биосистемах (растениях, животных, человеке), которые замыкаются во взаимосиливающиеся и самоподдерживающиеся порочные круги, например, антибиотикорезистентности. Процесс биотической трансформации в основном происходит при участии энзимов, при этом следует помнить, что при этом возможно образование реакционноспособных промежуточных продуктов, зачастую обладающих более высокой токсичностью, чем поступивший в систему поллютант [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 21]. Биотрансформация поллютанта (экоотоксиканта) может завершиться его минерализацией [1, с. 374–389; 9].

Многие соединения как естественного, так и антропогенного происхождения активно включаются в циклы обмена веществ биосферного уровня, активно и пассивно осуществляя переходы из одной среды обитания в другую, в том числе организменную. Если в силу физико-химических свойств и пространственно-временных обстоятельств поллютанту удастся миновать биологические барьеры, проникнуть в биосистему, то, попав во внутреннюю среду организмов, целый ряд поллютантов (токсикантов) вследствие токсикокинетических характеристик приобретают способность к материальной кумуляции, которая зачастую сопровождается функциональной [2, с. 105–118; 6; 10]. В современной научной литературе процесс, при котором живые организмы накапливают токсичные вещества из окружающей среды, извлекая их из абиотических компонентов среды обитания (воды, почвы, воздуха) и из пищи (трофическая передача) и превышая их концентрацию в окружающей среде, принято называть биоаккумуляцией. Этот процесс является фундаментальным в экотоксикологии и играет критическую роль в понимании влияния загрязнения на экосистемы. Таким образом, в результате биоаккумуляции (в экотоксикологии), как элемента патогенеза, могут быть негативные последствия как для индивидуального организма, так и для организмов, использующих данный биологический вид в качестве пищи [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 11].

Механизмы биоаккумуляции сложны и зависят от множества факторов, включая физико-химические свойства загрязнителя (его растворимость в жирах, стойкость

к разложению), физиологические характеристики организма (характеристики биотрансформации и экскреции загрязнителя), а также особенности окружающей среды (температура, pH, наличие других веществ). После поступления веществ в организм их судьба в наибольшей степени определяется видовыми токсикокинетическими особенностями, хотя обязательно подчиняется физико-химическим и общебиологическим закономерностям [2, с. 105–118; 17; 21]. При этом биоаккумуляция может лежать в основе не только хронических, но и отсроченных острых токсических эффектов. Стойкие поллютанты могут передаваться потомству, например, с содержимым желточного мешка у птиц и рыб, а у млекопитающих – с молоком кормящей матери. При этом у потомства возможно развитие эффектов, не проявляющихся у родителей [1, с. 374–389].

Множество химических веществ, в том числе поллютантов, перемещаются по пищевым цепям и пищевым сетям от организмов-продуцентов (автотрофам) к организмам-консументам (гетеротрофам) разных уровней, а от них – к детритофагам, и далее круги замыкаются, и в круговороте все повторяется. Для многих токсикантов, чаще липофильных, такое перемещение может сопровождаться увеличением их концентрации в тканях каждого последующего организма (звена пищевой цепи или сети) [6, с. 115–173; 9; 10]. Этот феномен называется биомагнификацией (биоусилением или биологическим увеличением). Это явление приводит к тому, что даже незначительное загрязнение может иметь катастрофические последствия для организмов на вершине трофической пирамиды. При этом обратный биомагнификации процесс, который происходит на всех трофических уровнях и сопровождается снижением концентрации загрязняющего вещества по мере его продвижения по пищевой цепи или сети называется биологическим разведением [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 11].

Последствия биоаккумуляции могут быть серьезными как для отдельных организмов, так и для всей экосистемы. Высокие концентрации токсичных веществ могут вызывать различные патологические изменения: от нарушения репродуктивной функции и иммунитета до повреждения нервной системы, печени и почек, что приводит к снижению численности популяции и даже к вымиранию видов. Более того, контаминация пищевых продуктов, полученных из организмов с высокой концентрацией токсикантов, представляет угрозу и для здоровья человека. Для минимизации риска биоаккумуляции необходимы эф-

фективные методы контроля загрязнения окружающей среды, разработка и внедрение экологически безопасных технологий, а также мониторинг уровня загрязнения в различных компонентах окружающей среды и биологических объектах. Научные исследования в области экотоксикологии играют ключевую роль в понимании механизмов биоаккумуляции и разработке стратегий по ее предотвращению.

Экотоксикодинамика – раздел экотоксикологии, в рамках которого изучаются закономерности и физиологические основы системных реакций надорганизменных биологических систем на действие токсикантов (поллютантов, в том числе обладающих признаками ксенобиотиков), исследуются и описываются механизмы патогенеза при развитии форм и проявлений токсического процесса, развивающегося в результате взаимодействия экотоксикантов и отдельных биологических видов и сообществ, а также биогеоценозов [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 16].

При рассмотрении вопросов экотоксикодинамики следует, несомненно, учитывать, что механизмы, посредством которых физиологически активные вещества (поллютанты, в том числе ксенобиотики) способны нарушать гомеостатические процессы, а также инициировать и поддерживать патогенетические аспекты, формирующие негативные проявления в биогеоценозах, многочисленны и зачастую уникальны [22]. Наблюдаемые и регистрируемые проявления экотоксического действия токсикантов целесообразно рассматривать в контексте трех основных механизмов (прямого, опосредованного и смешанного), акцентируя при этом внимание на проявлениях токсического действия на уровне: организма (аутоэкологические); популяции (демэкологические); биогеоценоза (синэкологические) [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 10]; биосферы (омниэкологические). Таким образом, под экотоксичностью можно понимать способность данного поллютантного профиля среды вызывать проявления токсического процесса в популяции, биоценозе, биосфере. Природа всегда находилась в хрупком равновесии, где малейшие изменения могут вызвать катастрофические последствия. Токсиканты, поступающие в экосистему, способны инициировать серию сложных биологических реакций. Среди множественности механизмов патогенеза токсического действия экотоксикантов, показывающих их многогранность и многообразность, тем не менее с достаточной степенью условности принято выделять: прямое действие токсикантов, приводящее к развитию алло-

биога, болезней, в этиологии и патогенезе которых значимую роль играет химический фактор, и специальных форм токсического процесса (в том числе эмбриотоксическое действие экополлютантов), что зачастую приводит к массовой гибели представителей чувствительных видов; прямое действие продуктов биотрансформации и абиотической трансформации поллютанта, которые могут проявляться непредсказуемыми способами, влияя на биоценоз; опосредованное действие, при котором, например, взаимодействие между видами в трофических сетях может изменяться под действием токсикантов, уничтожение конкурирующих видов создает условия для взрывного роста популяций, что может привести к дальнейшим экологическим дисбалансам. Такой комплексный эффект требует неотложного внимания со стороны ученых и экологов [1, с. 374–389; 2, с. 105–118; 10].

Наивысшей формой организации живых систем является оболочка Земли (глобальная экосистема Земли) – биосфера, со всей совокупностью ее свойств как планеты, заселенная всеми известными на сегодня формами живой материи, находящаяся в постоянном взаимодействии с ними и создающая условия для развития биологических систем. В ней осуществляются биоэнергетические, биоинформационные и биотрофические процессы, а также биотрансформация и геотрансформация материи [23–25].

Биосфера имеет сложные взаимоуравновешивающие системы и огромные экологические резервы поддержания гомеостаза планеты и возможности адаптации и эволюции в новых, изменяемых (в том числе человеком) условиях [4, 5, 25]. Однако целый ряд антропогенных стрессорных воздействий приводит к нарушению систем регуляции гомеостаза и истощению адаптационных возможностей биосферы, сопровождаемая отрицательными последствиями, с которыми биосфера справиться уже не в состоянии, по крайней мере в исторически относительно небольшие временные промежутки. В такой ситуации человечество оказывается на перепутье, где каждый шаг может стать решающим для будущего нашей планеты. Загрязнение атмосферного воздуха, истощение природных ресурсов и таяние ледников – все это не просто научные прогнозы, а реальность, с которой нам предстоит столкнуться уже в ближайшие десятилетия. В то время как технологии развиваются с поразительной скоростью, мы часто забываем о том, что природа, будучи сложной и хрупкой системой, требует бережного отношения [2, с. 105–118; 26]. Среди огромного числа антропогенных (техногенных) не-

благоприятных (стрессорных) воздействий на биосферу можно выделить: загрязнение биосферы ксенобиотиками – веществами, исходя из современных знаний об их значении, чужеродных для биологической системы (организма) и, как представляется на сегодня, не участвующих в пластическом или энергетическом обмене, регуляторном или модуляторном действии при поддержании гомеостаза системы (можно добавить, что и не участвующих в межсистемной коммуникационной функции), они могут быть как биотического, так и абиотического, в том числе и антропогенного, происхождения (пластмассы и полиэтилены, пестициды, синтетические поверхностно-активные вещества и др.); увеличение концентрации веществ в природной среде, которые обладают относительно низкой токсичностью, но поступают в биосферу в значительных объемах (таких как парниковые газы, окислы серы и азота, соединения тяжелых металлов, а также твердые отходы промышленности и быта), превышает возможности экосистем к адаптации; изменение естественных геохимических циклов происходит, когда природные уровни химических элементов заменяются их рассеиванием; чрезмерное и неэффективное использование природных ресурсов угрожающее способности экосистемы к восстановлению возобновляемых ресурсов [9–11].

В настоящее время большое внимание уделяется интеграции множества направлений человеческих знаний и мыслей в защите биосферы от загрязнений, в том числе химических. Напомним, что химический компонент среды обитания популяций и их сообществ является ведущим, поскольку сама жизнь, как уже отмечалось, есть форма существования белковых тел (и нуклеиновых кислот), представляющих собой биохимические субстраты, находящиеся в постоянном обмене своих составных частей с окружающей средой. Эволюционно наследственно закрепленное единство организмов и среды обитания предопределяет как жизненную необходимость определенный уровень содержания одних и тех же веществ в конкретных объектах биосферы, так и их токсичность [2, с. 105–118; 6; 18].

Выводы

1. На сегодняшний день насущным является расширение понятия о проявлениях токсического действия на всех уровнях организации жизни, в том числе: организма (аутокотоксические); популяции (демэтокотоксические); биогеоценоза (синэтокотоксические).

2. Необходимым представляется дальнейшее совершенствование методологии

исследования и описания соответствующими количественными и качественными характеристиками уникального поллютантного профиля среды. Обоснованным можно считать, исходя из современных знаний, конкретизацию понятия ксенобиотик.

3. Требуется выделение и дальнейшее всестороннее описание особой формы токсического процесса и ее проявлений на уровне биосферы. Закономерным становится формулирование определения и описание характеристик токсических процессов в биосфере (омниэтокотоксические).

Таким образом, высшей степенью проявления токсических (омниэтокотоксических) процессов на уровне биосферы и планеты является: уменьшение биоразнообразия, изменение ландшафтов и границ природно-климатических зон, глобальное потепление климата, рост числа природных катаклизмов и катастроф. При этом целый ряд процессов запускает, по механизму обратной связи, «порочные круги», когда, например, выделение антропогенных (техногенных) парниковых газов приводит к потеплению, а потепление провоцирует усиленное выделение биогенных парниковых газов. В этой связи представляется заслуживающим внимания мнение о выделении за рамками экотоксикологии, в качестве самостоятельного направления, из разделов естествознания, физиологии и токсикологии биосферы.

Список литературы

1. Куценко С.А. Основы токсикологии. СПб.: Фолиант, 2004. 715 с.
2. Иванов М.Б. Токсикология. Т. I. Начала токсикологии: монография. Гатчина: Княгиня Ольга, 2024. 222 с.
3. Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д., Розенберг А.Г. Иерархия экологических гомеостазов как принцип системологии // Известия РАН. Серия биологическая. 2023. № 7. С. 118–128. DOI: 10.31857/S1026347023600231.
4. Цюпка В.П. О понимании структурности и системности живого // Научное обозрение. Фундаментальные и прикладные исследования. 2018. № 1. URL: <https://scientificreview.ru/ru/article/view?id=11> (дата обращения: 30.09.2024).
5. Цюпка В.П. О понимании системной организации живого // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2018. № 18–2. С. 13–17.
6. Безель В.С. Экологическая токсикология: популяционный и биоценотический аспекты. Екатеринбург: Гошкин, 2006. 279 с.
7. Безель В.С. Экологическая токсикология в системе наук о биосфере // Биосфера. 2012. Т. 4, № 2. С. 131–141.
8. Захаров В.М., Смуров А.В. Концепция здоровья среды: история и перспективы развития (основные вехи) // Жизнь Земли. 2018. № 40 (2). С. 152–157.
9. Бродский А.К., Сафронова Д.В. Глобальный экологический кризис: взгляд на проблему через призму биоразнообразия // Биосфера. 2017. Т. 9, № 1. С. 48–70. DOI: 10.24855/biosfera.v9i1.323 / www.21bs.ru.
10. Стадницкий Г.В. Экология: учебник для вузов. 13-е изд., стереотип. СПб.: Химиздат, 2024. 296 с.

11. Салова Т.Ю., Громова Н.Ю. Техногенные системы и экологический риск // *Международный журнал экспериментального образования*. 2015. № 2. С. 295–296.
12. Черняева Т.К. Актуальные проблемы влияния отходов производства и потребления на объекты окружающей среды и состояние здоровья населения (обзор литературы) // *Гигиена и санитария*. 2013. № 3. С. 32–35.
13. Коломенская В.А. Анализ воздействия отходов производства на экосистему // *Вестник науки*. 2024. Т. 4, № 5 (74). С. 1986–1995.
14. Штабский Б.М., Гжегоцкий М.Р., Шафран Л.М. Элементы системного подхода в гигиеническом нормировании ксенобиотиков // *Гигиена и санитария*. 2016. № 95 (3). С. 311–315. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-3-311-315.
15. Жолдакова З.И., Сеницына О.О. Единые подходы к оценке токсичности и опасности химических веществ, поступающих в организм с воздухом, водой и пищей // *Российский химический журнал*. (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2004. Т. XLVIII, № 2. С. 25–33.
16. Захаров В.М. Концепция здоровья среды: теория и практика (проблемы и перспективы) // *Жизнь Земли*. 2018. № 40 (3). С. 293–300.
17. Маликова И.М., Тимофеева А.В., Каримова Л.И. Оценка эффективности мероприятий по обеспечению техносферной безопасности // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024. Vol. 5–5 (92). P. 98–101. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-5-5-98-101.
18. Голиков С.Н., Саночкин И.В., Тиунов Л.А. Общие механизмы токсического действия. Л.: Медицина, 1986. 279 с.
19. Гелашвили Д.Б. Популяционная экотоксикология и экологические риски // *Теоретические проблемы экологии и эволюции* (Шестые Люблинские чтения). Тольятти: Касандра, 2015. С. 89–93.
20. Кузьмин С.Б. Опасные природные процессы – глобальная угроза современности // *Век глобализации*. 2021. № 2 (38). С. 17–29. DOI: 10.30884/vglob/2021.02.02.
21. Костюк С.А. Система биотрансформации ксенобиотиков: гены детоксикации // *Медицинские новости*. 2020. № 11. С. 12–16.
22. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Гомеостатические механизмы биологических систем: пролегомены // *Известия РАН. Серия биологическая*. 2023. № 7. С. 3–8. DOI: 10.31857/S1026347023600152.
23. Яблоков А.В., Левченко В.Ф., Керженцев А.С. Очерки биосферологии. Биосфера как живая система. Об особенностях эволюционного процесса на биосферном уровне // *Философия и космология*. 2016. Т. 17, С. 152–174.
24. Колчинский Э.И. Развитие идей В.И. Вернадского об эволюции биосферы в отечественной литературе: факты и гипотезы // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15, № 3. С. 9–16.
25. Протасов А.А. Структура, эволюция биосферы и возможные пути ноосферогенеза // *Вестник Сибирского федерального университета. Биология*. 2016. № 9 (3). С. 256–290. DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-256-290.
26. Шефтель Б.И., Якушов В.Д. Влияние потепления климата на наземные виды средней енисейской тайги // *Сибирский экологический журнал*. 2022. Т. 1. С. 1–12. DOI: 10.15372/SEJ20220101.