

ВОРОБЕЙЧИК Е. Л., кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Института экологии растений и животных УрО РАН, заведующий лабораторией популяционной экотоксикологии. Автор более 50 публикаций, в том числе: *Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень)*. Екатеринбург, 1994. 280 с. (монография в соавторстве с О. Ф. Садыковым и М. Г. Фарафоновым); *Популяционная экотоксикология*. М.: Наука, 1994. 83 с. (монография в соавторстве с В. С. Безелем и В. Н. Большаковым).

Область научных интересов: экологическое нормирование, реакция почвенной биоты на химическое загрязнение, биоиндикация.

ЭКОЛОГИЯ ИМПАКТНЫХ РЕГИОНОВ: ПЕРСПЕКТИВЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Территории, расположенные вокруг точечных источников эмиссии поллютантов (заводы цветной и черной металлургии, минеральных удобрений, цементные, нефтехимические и др.), – традиционная область интересов экологов, географов и гигиенистов. К настоящему времени выполнено чрезвычайно много работ, затрагивающих самые различные аспекты действия таких источников на живую и неживую природу – от накопления поллютантов в депонирующих средах и биоте до анализа реакций популяций и экосистем. Результаты этих работ в той или иной степени рассматриваются во многих разделах общей и прикладной экологии – в теории адаптации, биогеохимии, биоиндикации, экологическом мониторинге, экспертизе, прогнозировании, нормировании и других. В то же время ни одно из существующих направлений не охватывает всю проблематику этих весьма специфических территориальных образований полностью. Можно констатировать отсутствие целостного взгляда на закономерности трансформации экосистем в районах действия точечных источников эмиссии поллютантов. Это делает уместным выделение нового научного направления, призванного заполнить указанный пробел. Мы предлагаем обозначить его как «экология импактных регионов» (термин «импактный» происходит от английского «impact» – удар, воздействие). Данное направление вводится по аналогии с экологией регионов атомных станций (Егоров, 1994), в которой рассматривается весь комплекс проблем, возникающих на этих также достаточно специфических территориях.

Настоящая работа – это, фактически, попытка найти ответы на два вопроса: «что мы знаем о реакции экосистем на загрязнение от точечных источников выбросов?» и «чего мы не знаем об этой реакции?» И если для ответа на первый вопрос потребовалось «всего лишь» суммировать имеющиеся многочисленные данные, то ответ на второй зависит от определения цели исследований. Последнее же, т. е. ответ на вопрос «что мы хотим получить?», всегда носит характер «авторской версии» с неизбежным (и весьма значительным!) субъективизмом. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке изложенных в настоящей работе соображений.

Немаловажен следующий аспект: сейчас исследования в районах промышленного загрязнения в большинстве случаев носят прикладной характер.

Это означает, что цели таких работ определяет «внешний заказчик» (и в данном случае даже не важно, получает исследователь деньги от этого заказчика или имеет место «социальный заказ»). В этом принципиальное отличие прикладных исследований от фундаментальных, цели которых вытекают из самой логики научного поиска. Одной из задач данной работы было показать, что импактные регионы – удобный объект для решения многих задач фундаментальной экологии.

И последнее предварительное замечание. Данная работа носит мета-научный характер. Но для строгого мета-анализа требуется адекватная база данных. Само по себе ее построение – чрезвычайно сложная задача: предполагаемое количество литературных источников по вопросам экологии импактных регионов составляет несколько тысяч, каждый из источников должен быть «расчленен» по нескольким десяткам полей. К сожалению, мы не располагаем такой базой, поэтому вынуждены пользоваться ее «суррогатом» – собственным опытом эксперта в данной проблеме, безусловно, осознавая все минусы и ограничения, присущие любым экспертным оценкам.

Объект исследований

Рассматривая вопрос об объекте исследований в экологии импактных регионов, имеет смысл различать *реальные объекты*, которые составляют предмет изучения в конкретных работах, и *идеальные объекты*, выступающие в определенном смысле эталонами при выборе реальных объектов. Заметим, что идеальный объект – это теоретический конструкт, который обычно отсутствует в природе (как, например, идеальный газ), но полезен в теоретическом отношении.

Реальный объект – это импактный регион, под которым понимается территориальный комплекс экосистем разного пространственно-временного масштаба, расположенных возле точечного источника эмиссии поллютантов и подверженных воздействию загрязнения от этого источника. Можно выделить по крайней мере три ключевых отличия импактного региона от других объектов. Во-первых, основной путь поступления поллютантов (газообразных и пылевых частиц) – атмосферный. Во-вторых, вокруг источника расположены в основном природные экосистемы (а не городские или сель-

скохозяйственные территории). Наконец, в-третьих, основное отличие заключается в градиентной природе загрязнения. С удалением от источника выбросов происходит постепенное (но не всегда гладкое) уменьшение поступления поллютантов, соответственно, экосистемы получают все меньшие дозы токсических нагрузок. Из-за этого импактный регион представляет собой специфическую пространственную структуру из концентрически расположенных зон с разной степенью загрязнения и, соответственно, различным уровнем трансформации экосистем. Обычно выделяют три-четыре зоны трансформации: техногенную пустыню, импактную, буферную и фоновую (последняя зона, строго говоря, не входит в импактный регион). Провести точную границу импактного региона так же сложно, как и провести границу фитоценоза или биогеоценоза. В общем случае можно определить, что пространственная граница импактного региона проходит там, где с помощью современных методов уже не удастся отделить локальное действие загрязнения от естественно обусловленных изменений, а также фоновых (региональных и глобальных) выпадений поллютантов. Эта граница отделяет импактный регион от фоновой территории.

Идеальный объект – это такой импактный регион, который удовлетворяет следующим условиям:

1. До начала действия источника выбросов на всей территории его потенциального влияния была однородная в пространстве фоновая среда. Другими словами, на рассматриваемой территории нельзя было провести существенных границ ни по геологическим особенностям, ни по почвенному покрову, ни по растительности. Более мягкая формулировка данного условия: на всей территории можно было подобрать пробные площади, идентичные по характеристикам экотопа и биоценоза.

2. Токсическая нагрузка от точечного источника однородна во времени в течение всего периода его действия. Другими словами, состав, структура и объем выбросов не претерпели существенных изменений с начала действия источника и до времени проведения исследований.

3. На всей территории импактного региона нет других существенных антропогенных нагрузок (токсических, рекреационных, пастбищных, радиационных и пр.); соответственно, все изменения в экосистемах обусловлены действием только одной нагрузки – поступлением поллютантов от единственного в данном районе точечного источника выбросов.

В качестве дополнительного – и наименее реального – условия можно принять следующее: в течение всего периода действия источника выбросов на всей территории импактного региона ведутся мониторинговые (т. е. непрерывные во времени) исследования по комплексу параметров состояния экосистем (и, желательно, на постоянных пробных площадях).

Совершенно очевидно, что любой экспериментальный полигон возле любого из известных точечных источников в той или иной мере отклоняется от идеального объекта. Однако в каждом конкретном случае важно оценивать степень такого отклонения.

Цели исследований

Каждая конкретная работа, связанная с анализом реакции экосистем на загрязнение, преследует свои конкретные цели. Но если рассматривать экологию импактных регионов как фундаментальное, а не прикладное направление, то должна существовать интегрирующая, в определенном смысле конечная цель исследований. В качестве такой цели мы предлагаем считать создание *теории изменений экосистем импактного региона*. Под термином «теория» в данном случае понимается в той или иной степени формализованная модель изменений. Как аналогию можно рассматривать теорию климата – модель, предсказывающую температуру, количество осадков и другие климатические характеристики в любой точке Земли в любой момент времени при известных значениях входных переменных – величины солнечной радиации, расположения материков, времени года и пр. Таким образом, теория изменений экосистем – это модель, предсказывающая состояние экосистем (с разной степенью детализации) в любой момент времени и в любой точке пространства возле точечного источника выбросов в зависимости от исходного состояния экосистем, характеристик источника и ландшафтных особенностей территории.

Используя формализованную запись, сказанное выше (для случая идеального объекта) можно выразить следующим образом:

$$E(x, y; t) = f_1(E(x, y; t_0), D(x, y), L(x, y)),$$

где $E(x, y; t)$ – набор параметров состояния экосистемы, описывающий ее структурно-функциональные особенности в точке с координатами x, y и в момент времени t ; t_0 – начальный момент времени (до начала действия источника выбросов), $D(x, y)$ – набор параметров токсической нагрузки в точке с координатами x, y ; $L(x, y)$ – набор параметров, описывающих ландшафтные особенности точки с координатами x, y (подстилающая поверхность, орография и др.); f_1 – функция произвольного вида.

В свою очередь, распределение токсической нагрузки по территории – это функция параметров источника выбросов (высота труб, температура исходящих газов, особенности технологических циклов и др.) и параметров климатической обстановки (повторяемость ветра, сезонный ход температуры и осадков и др.):

$$D(x, y) = f_2(S, C),$$

где S – набор параметров источника выбросов, C – набор климатических параметров; f_2 – функции произвольного вида.

Написать подобные уравнения в такой самой общей форме очень легко, наполнить их реальным

содержанием – чрезвычайно сложно. Относительно удовлетворительно это сделано для второго уравнения (имеются в виду многочисленные модели атмосферного переноса). Для того чтобы конкретизировать первое уравнение, необходимо, во-первых, точно, т. е. количественно, описывать изменения экосистем на разных уровнях организации в зависимости от величины токсической нагрузки; во-вторых, необходимо хорошо знать механизмы (т. е. причинно-следственные связи) изменений. Фактически, конкретизация первого уравнения выливается в необходимость построения системы зависимостей типа «доза – время – эффект» для большого набора параметров биоты; причем эти зависимости различаются для разных типов экосистем и разных типов ландшафтов.

Таким образом, теория изменений экосистем должна описывать весь процесс развития импактного региона – от его «рождения» в момент пуска предприятия до стабилизации на стационарном уровне, когда расширение границ импактного региона становится очень медленным. Причем описание изменений должно касаться всех основных компонентов на всех иерархических уровнях. Поставленная конечная цель – это своего рода «сверхзадача», вряд ли достижимая в ближайшей перспективе. В то же время из истории науки известно, что формулировка «сверхзадач», даже таких неразрешимых, как квадратура круга или трисекция угла, была важна в качестве стимула научного поиска, который мог приводить к неожиданным и очень интересным результатам (Капица и др., 1997).

Современное состояние исследований

Работ, которые могут быть отнесены к экологии импактных регионов, выполнено чрезвычайно много. Более того, их выполнено настолько много, что у «стороннего наблюдателя» может создаться иллюзия практически полной изученности данной проблемы. Но если рассматривать в качестве конечной цели исследований создание теории изменения экосистем в импактных регионах, то можно прийти к неожиданному выводу: мы очень мало знаем о функционировании импактных экосистем. Для обоснования этого тезиса рассмотрим изученность реакции экосистем на загрязнение с точки зрения точности описания изменений, широты и глубины охвата исследованиями разных компонентов.

Описывать изменения экосистем под действием загрязнения можно с разной точностью. В данном случае, под точностью понимается степень полноты получаемого знания. Логично выделить по крайней мере три уровня точности – низкий, средний и высокий (табл. 1), каждому из которых соответствует определенная экспериментальная схема (т. е. характер организации исследований) и определенный набор результирующих параметров. В конечном итоге работы, выполненные на разных уровнях точности, приводят и к различным моделям изменений: от наиболее «грубой» качественной модели до наиболее точной количественной. Уровни точности – это, фактически, последовательные ступени приближения к «истинному знанию» о реакции экосистем на загрязнение. Даже поверхностного взгляда достаточно, чтобы прийти к выводу: подавляющее большинство работ в области экологии импактных регионов выполнено на низком уровне точности, мало работ – на среднем и очень мало – на высоком.

Таблица 1

Описание изменений экосистем при разных уровнях точности

Уровень точности	Экспериментальная схема	Оцениваемые характеристики	Тип модели
Низкий	Сравнение «опыта» (максимально нарушенное состояние) и «контроля» (фоновое состояние)	Наличие угнетения, элиминации или стимуляции групп биоты	Качественная: различие в составе и соотношении компонентов экосистем; направленность (увеличение или уменьшение с ростом загрязнения) и максимальная амплитуда изменений
Средний	Измерение загрязнения и параметров биоты в пределах 3–7-й зон нагрузки	Порог чувствительности, предел толерантности	Полуколичественная: ряды чувствительности / толерантности видов (компонентов); схемы дигрессии
Высокий	Параллельное измерение загрязнения и параметров биоты в 20–50 точках	Траектория реакции биоты на нагрузку	Количественная: регрессионные уравнения «доза – эффект»; скорости изменений параметров на разных участках градиента; координаты критических точек

Для оценки широты охвата исследованиями разных групп биоты были рассмотрены все доступные публикации по 17 наиболее известным источникам выбросов (табл. 2). Заметим, что изложение результатов работ возле этих источников составляет порядка 60–70 % от общего количества публикаций по реакции биоты на загрязнение в импактных регионах. Хотя в целом ни одна из групп биоты не

осталась не охваченной, нет ни одного района, где бы в поле зрения исследователей попали все группы. Наиболее приближены к этому два района – на Кольском полуострове и на Среднем Урале. Такая ситуация – очевидное препятствие на пути сравнительного изучения реакции разных объектов и, в конечном итоге, познания механизмов трансформации экосистем.

Охват исследованиями разных компонентов биоты возле наиболее изученных точечных источников эмиссии поллютантов («+» – объект изучался, «-» – объект не изучался)

Источник, район	Год пуска	Основные ингредиенты выбросов	Компоненты биоты														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ni-Cu-плавильный. Sudbery (Канада)	1884	SO ₂ , Ni, Cu, Fe, Ag, Au, Se	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Zn-плавильный. Palmerton (США)	1898	SO ₂ , Cd, Cu, Pb, Zn, Fe	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Zn-Cu-перерабатывающий. Gusum (Швеция)	1661	Zn, Cu, Pb, Cd	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-
Zn-Pb-Cd-плавильный. Avonmouth (Англия)	1928	SO ₂ , Zn, Pb, Cd, Cu	+	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-
Cu-перерабатывающий. Liverpool (Англия)	1930	Cu, Cd	-	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Cu-Ni-плавильный. Harjavalta (Финляндия)	1944	SO ₂ , Cu, Ni	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+
Cu-плавильный. Ronnskarsverken (Швеция)	1936	SO ₂ , Pb, Cu, Zn, As, Hg	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+
Cu-Ni-Co-плавильный. "Североникель" (Кольский полуостров)	1939	SO ₂ , Ni, Cu, Co	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+
Cu-плавильный. Ревда (Средний Урал)	1940	SO ₂ , Cu, Pb, Zn, Cd	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+
Cu-плавильный. Карабаш (Южный Урал)	1910	SO ₂ , Cu, Cd, Pb, Zn	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+
Cu-плавильный. Красноуральск (Средний Урал)	1932	SO ₂ , Cu, Pb, Zn, Cd	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-
Фосфатных удобрений. Jena (Германия)	?	F, P, CaO	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-
Zn-плавильный + другие заводы. Верхняя Силезия (Польша)	?	SO ₂ , Cu, Pb, Zn, Cd, CaO	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+
Металлургические и химические заводы. Halle-Leipzig-Bitterfeld (Германия)	1915	SO ₂ , CaO, Cl ₂ , HCl, NO _x , H ₂ S, органика	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+
Цементный завод. Броцен (Латвия)	?	CaO	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-
Нефтехимический завод. Белоруссия	?	SO ₂ , H ₂ S, NH ₃ , NO _x	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-
Алюминиевый завод. Братск (Восточная Сибирь)	1965	HF	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+

Примечание. 1 – почва; 2 – древостой; 3 – травостой; 4 – мхи; 5 – лишайники; 6 – беспозвоночные герпетобионты; 7 – беспозвоночные хортобионты; 8 – беспозвоночные филло- и ксилобионты; 9 – почвенная мезофауна; 10 – почвенная микрофауна; 11 – почвенная микрофлора; 12 – сапротрофные грибы; 13 – симбиотрофные грибы; 14 – птицы; 15 – млекопитающие.

Рассмотрение изученности реакции экосистем на загрязнение с точки зрения глубины исследований наталкивается на значительные трудности. Хорошо известно, что природные экосистемы – чрезвычайно сложные объекты, которые могут быть описаны на разных иерархических уровнях. Для биоты, начиная с работ Н. В. Тимофеева-Ресовского, развито представление о трех – четырех уровнях организации (суборганизменном, организменном, популяционном и ценотическом; иногда количество выделяемых уровней организации дохо-

дит до 8–9). Для небиотических компонентов экосистем (почва, климатоп, поллютанты и др.) такие представления либо находятся в зачаточном состоянии, либо отсутствуют вовсе. Поэтому, пытаясь оценить изученность реакции разных компонентов экосистем в единой шкале, необходимо «попутно» решить проблему единой иерархии параметров описания всех этих объектов. В табл. 3 представлены основные параметры описания наземных экосистем, разнесенные по трем иерархическим уровням. Принцип построения этой таблицы состоит в сле-

дующем: изменения параметров более высокого уровня могут быть объяснены изменением параметров более низкого. Первый уровень соответствует ценологическому, второй – популяционному, третий – организменному и суборганизменному (поскольку нет устоявшейся терминологии для небиотических компонентов, уровни обозначены номерами).

В табл. 4 представлена наша экспертная оценка изученности реакции биотических и небиотических компонентов наземных экосистем в рассматриваемом аспекте. Оценка сделана по количеству работ и уровню обобщений, касающихся реакции объектов. Хорошо видна сильная неравномерность изученности разных объектов на разных уровнях организации. Это также существенное препятствие для создания теории изменений экосистем, для которой необходима информация о причинно-следственных связях.

Суммируя вышесказанное, можно выделить три основные причины невозможности достижения в

ближайшей перспективе основной цели экологии импактных регионов:

1. Описание изменений на невысоких уровнях точности и, соответственно, преобладание работ, дающих только качественную картину изменений.

2. Отсутствие комплексности в изучении реакции экосистем, соответственно, невозможность прямого сопоставления реакций разных групп биоты возле конкретного источника.

3. Существенная неполнота информации для конкретных групп биоты по параметрам разных уровней организации, соответственно, сложность расшифровки механизмов изменений.

В качестве дополнительной причины можно отметить, что во многих работах реальные объекты очень сильно отклоняются от идеальных. Наиболее часто встречаемое отклонение – сочетание нескольких видов антропогенных нагрузок, что не позволяет упростить ситуацию до анализа действия локального загрязнения «в чистом виде».

Основные параметры описания объектов на разных уровнях организации

Объекты	Уровни организации		
	I	II	III
Биоценоз (структурный подход)	Обилие таксоценоза Структура таксоценоза: – количество видов / групп; – соотношение обилий видов / групп (кривые доминирования, индексы разнообразия) Динамика сообществ: – цикличность; – фенология Взаимодействие популяций: – напряженность конкуренции; – структура трофических сетей; – структура консорциев	Обилие популяций Структура популяций: – генетическая; – фенетическая; – размерная; – возрастная; – половая; – функциональная; – этологическая; – пространственная Динамика численности популяций: – рождаемость (смертность); – миграционная активность; – цикличность динамики	Морфо-физиологические параметры (размеры и масса тела и органов, корреляции, аллометрические зависимости, активность ферментных систем) Мутационный процесс (частоты и типы нарушений генома) Гаметогенез (обилие и жизнеспособность гамет) Ход онтогенеза: – темпы роста; – завершенность стадий развития; – стабильность развития (флуктуирующая асимметрия); – типы и частоты терат
Экосистема (функциональный подход)	Общая биомасса, продукция, дыхание, запас органического вещества Интегральные параметры биотического круговорота (скорость оборота органики и др.) «Блоковая» структура: – состав функциональных «блоков»; – соотношение «блоков» по массе, продукции, продуктивности	Балансовые модели биотического круговорота: – вещества / углерода / энергии; – биогенов (N, P, K); – автохтонных макро- и микроэлементов	Скорости процессов, детерминируемых биотой (фотосинтез, дыхание, транспирация, отчуждение биомассы консументами, экскреция, деструкция органики)
Почва	Морфология почвенного профиля (состав, мощность и текстура генетических горизонтов) Выраженность элементарных почвообразовательных процессов Таксономический статус педона	Параметры почвенного поглощающего комплекса: – емкость катионного обмена; – показатели кислотности; – буферность Органическое вещество: – запас; – соотношение фракций; – распределение по профилю Агрегатный состав	Водно-физические параметры (плотность, пористость, удельная поверхность, показатели влагоемкости и др.) Гранулометрический состав Скорости гумификации и минерализации Ферментативная активность Состав и активность почвенной биоты

Абиота	<p>Радиационный баланс Тепловой баланс Водный баланс Баланс основных ионов</p>	<p>Микроклимат (температурный, водный, воздушный, световой режим) Газовый и аэрозольный состав атмосферы Балансовые модели радиально-латеральной миграции автохтонных макро- и микроэлементов</p>	<p>Константы теплопроводности, влагопроницаемости, влагоемкости, транспирации и альбедо субстратов. Константы сорбции / десорбции элементов</p>
Поллютанты	<p>Поле концентраций (выпадений, доз) поллютантов возле источника: – содержание в депонирующих средах; – результаты расчетов по моделям атмосферного переноса Соотношение компонентов экосистем (виды и группы биоты, почва, растворы, воздух) по: – концентрациям поллютантов; – запасам поллютантов</p>	<p>Балансовые модели биотического круговорота поллютантов в экосистеме Балансовые модели радиально-латеральной миграции поллютантов Неоднородность распределения поллютантов: – пространственная; – внутритропуляционная</p>	<p>Балансовые модели поглощения, транслокации и выделения поллютантов для разных видов Динамические модели трансформации поллютантов в почве (скорости сорбции, модификации) «Химическое поведение» поллютантов: – миграционная активность; – формы нахождения в природе (хелаты, коллоиды и др.); – взаимодействие разных поллютантов между собой</p>

Таблица 4

«Глубина» изученности реакции на загрязнение различных объектов на разных уровнях организации

Объект	Уровни организации		
	I	II	III
Биоценоз (структурный подход):			
Древесный ярус	2	2	3
Травяно-кустарничковый ярус	3	3	3
Моховой покров	3	1	2
Лишайниковый покров	3	1	2
Беспозвоночные герпетобионты	2	2	1
Беспозвоночные хортобионты	2	1	1
Беспозвоночные денробионты	2	2	1
Почвенная мезофауна	2	1	1
Почвенная микрофауна	1	2	2
Почвенные микроорганизмы	3	1	1
Сапротрофные грибы	1	0	0
Симбиотрофные грибы	2	0	0
Амфибии, рептилии	1	2	2
Птицы	1	2	2
Млекопитающие	2	2	2
Экосистема (функциональный подход)	1	1	2
Почва	1	2	2
Абиота	1	2	1
Поллютанты	4	3	4

Примечание. Степень изученности: 0 – объект не изучался, 1 – слабая (единичные работы, 1–3 района, отрывочные сведения), 2 – средняя (десятки работ, 5–10 районов), 3 – хорошая (десятки – сотни работ, обобщения уровня специальных обзоров), 4 – очень хорошая (несколько сотен работ, обобщения уровня монографий и учебников).

Что мы знаем о реакции экосистем на загрязнение

Вероятнее всего, в области экологии импактных регионов пока рано говорить об обобщениях уровня законов. Более правомерно рассматривать известные к настоящему времени закономерности реакции экосистем как *эмпирические обобщения*. Ниже, на основе анализа многих работ, в том числе ряда обзоров (Смит, 1985; Биоиндикация, 1988; Козлов, 1990; Воробейчик и др., 1994), сформулированы такого рода обобщения, касающиеся в целом реакции экосистем и наблюдающиеся возле источников любого типа. Часть из этих обобщений общеизвестны (и поэтому представляются достаточно очевидными, если даже не банальными), часть – менее тривиальные. Собранные воедино, они формируют систему современных воззрений на функционирование экосистем в импактных регионах. Это, фактически, развернутый ответ на вопрос, вынесенный в заголовок раздела.

1. *Единство качественной картины трансформации экосистем возле разных источников одного типа в разных географических зонах; масштаб поражения – это функция мощности источника и природных условий.* Другими словами, возле небольшого заводика в США и крупного комбината в России общие закономерности изменений экосистем, не зависящие от пространственного масштаба, будут очень сходными (подобными в геометриче-

ском смысле). Если же необходимо получить «абсолютную» картину возле конкретного источника, то следует учесть его мощность, а также природные условия района.

2. *Разная устойчивость к нагрузке разных видов, групп, типов экосистем.* Хорошо известно, что виды и надвидовые таксоны реагируют на загрязнение не одинаково: одни более чувствительны и исчезают в первую очередь, другие более толерантны и могут переносить высокие уровни загрязнения. Также различаются по чувствительности и типы экосистем (например, сосновые и березовые леса). Эта особенность зависит от многих причин, выявление которых в каждом конкретном случае – специальная задача. Собственно, разная чувствительность – это главный фактор уменьшения видового разнообразия (чувствительных видов больше, чем толерантных) и изменения структуры сообществ (замена чувствительных групп толерантными), что наблюдается при увеличении загрязнения.

3. *Загрязнение неблагоприятно для стенобионтов и благоприятно для эврибионтов, генералистов, пластичных и преадаптированных к изменениям видов.* Это заключение – уточнение предыдущего обобщения относительно того, какие именно виды и группы являются чувствительными, а какие толерантными. Чаще всего (хотя имеются и исключения) при увеличении загрязнения в первую очередь исчезают узкоспециализированные виды, имеющие небольшую ширину ниши по фактору, который меняет загрязнение. Широко распространенные и неспециализированные виды, которые могут обитать в разнообразных местообитаниях, или виды, приспособленные к неблагоприятным естественным факторам, по действию сходным с загрязнением (например, засоление почвы), выживают в условиях высоких токсических нагрузок и доминируют на импактных территориях. Более того, из-за снижения конкуренции такие виды могут даже увеличивать обилие в этих условиях.

4. *Трансформация экосистем в импактных регионах – это дигрессия (т. е. вариант сукцессии, противоположный прогрессии), при которой наблюдается:*

– *упрощение структуры* (уменьшение α -разнообразия); т. е. сообщества импактной территории обычно состоят из существенно меньшего количества видов, чем фоновой;

– *конвергенция сообществ* (уменьшение β -разнообразия); другими словами, токсическая нагрузка нивелирует исходные различия между сообществами, т. е. разные дигрессионные ряды «сходятся», приводя к одинаковым заключительным стадиям;

– *зеркальность стадий дигрессии и прогрессии* (заклучительные стадии дигрессии, имеющие место в зоне техногенной пустыни, похожи на начальные стадии демулационной сукцессии; первые стадии дигрессии – сходны с климаксовыми сообществами фоновой территории; однако наблюдаемое сходство

не абсолютно, это, скорее, «сходство в общих чертах»).

5. *Возможная немонотонность реакции биоты на загрязнение, а именно:*

– *разнонаправленность реакции одной группы (подавление, стимуляция) при разных уровнях загрязнения;*

– *разнонаправленность реакции разных групп при одном уровне загрязнения.*

Данное обобщение уточняет предыдущее – процесс трансформации далеко не гладкий: группа, исчезающая при высоких уровнях загрязнения, при средних может увеличивать обилие; соответственно, при определенной величине нагрузки может наблюдаться широкий спектр реакций разных групп (отсутствие изменений, подавление, стимуляция).

6. *Неспецифичность реакции биоты на токсическую нагрузку.* Неоднократно было отмечено, что техногенные изменения экосистем по своим проявлениям аналогичны естественно обусловленным. Другими словами, биота реагирует одинаково на любые неблагоприятные для нее изменения среды, вне зависимости от их причины. Соответственно, каждому феномену, наблюдаемому в импактных регионах, при желании можно подобрать природный аналог.

7. *Нелинейность реакции биоты на нагрузку, выражающаяся в:*

– *разной скорости изменений при разных уровнях нагрузки* (т. е. на определенных участках градиента загрязнения имеют место медленные или, по крайней мере, пропорциональные величине нагрузки изменения; однако имеются также участки, где незначительное увеличение нагрузки вызывает непропорционально сильную реакцию биоты);

– *наличию порога в реакции*, т. е. при малых нагрузках эффект не обнаруживается.

Нелинейность реакции обычно выражается в S-образной форме зависимостей доза – эффект, когда выражены два метастабильных состояния (участки с медленными изменениями), переход между которыми очень резкий (участок градиента с быстрыми изменениями). Наличие нелинейности в реакции биоты – чрезвычайно важный момент, который необходимо учитывать при построении теории изменений экосистем в импактных регионах: моделировать нелинейные зависимости значительно сложнее, чем линейные. Более того, это накладывает принципиальные ограничения на возможность абсолютно точного предсказания изменений.

Обобщениями более низкого ранга выступают *частные закономерности*, которые наблюдаются возле источников определенного типа и в определенных физико-географических условиях. Эти закономерности конкретизируют рассмотренные выше эмпирические обобщения. Важно подчеркнуть специфичность частных закономерностей относительно типа источника. Например, часто сообщается об уменьшении первичной продукции и торможении деструкции органики на загрязненных терри-

ториях. Это, действительно, наблюдается возле источников, эмитирующих тяжелые металлы. Однако возле заводов, выбрасывающих азотсодержащие соединения, наблюдается прямо противоположная ситуация – резкое увеличение обилия травянистых растений и возрастание скорости деструкции органики. Следовательно, снижение продукции и торможение деструкции – частные закономерности, специфичные для источников выбросов определенного типа.

Чего мы не знаем о реакции экосистем на загрязнение

Рассмотрим другой основной вопрос нашей работы, т. е. сформулируем наше знание о незнании. Из анализа рассмотренных выше эмпирических обобщений достаточно логично вытекает ряд вопросов, остающихся пока без ответа. Ниже эти вопросы изложены в виде гипотез, требующих проверки в конкретных работах.

1. Экосистемы под действием токсической нагрузки «ломаются, но не гнутся», т. е. сохраняют важные особенности функционирования при значительных уровнях нагрузки (альтернатива: «гнутся, но не ломаются», т. е. постепенно меняются при увеличении нагрузки).

2. Демутационные микросукцессии (например при механических нарушениях) в импактных регионах замедляются (альтернатива: ускоряются, другая альтернатива – токсическая нагрузка не оказывает влияния на скорость демутационных микросукцессий).

3. Основной вклад в нарушение биологического круговорота вносит уменьшение продукции (альтернатива: торможение деструкции, другая альтернатива – одинаковый вклад).

4. Устойчивые к загрязнению виды преадаптированы (альтернатива: адаптированы).

5. Критические звенья жизненного цикла – это производство и / или раннее развитие потомков (альтернатива: взрослые стадии).

6. Выраженность эффектов падает в ряду сообщество > популяция > организм (альтернатива: ряд другой).

7. Экосистемы в импактных районах – это эволюционно новые типы (альтернатива: варианты существующих сукцессионных рядов).

8. Вклад в реакцию биоты на загрязнение прямого токсического действия и опосредованного этим действием изменения среды обитания различен для разных групп. Доминируют прямые эффекты: лишайники, сапрофаги мезофауны, почвенная микрофлора; одинаковый вклад прямых и косвенных эффектов: древесные растения, травянистые растения, мхи, зоофаги мезофауны, сапротрофные грибы, симбиотрофные грибы, птицы; доминируют косвенные эффекты: фитофаги мезофауны, почвенная микрофауна, беспозвоночные фило- и ксилобионты, герпетобионты и хортобионты, муравьи,

млекопитающие. (Альтернативная гипотеза: другое соотношение прямых и косвенных эффектов для указанных групп.)

Импактные регионы – удобный полигон для развертывания широкого спектра научных исследований, как фундаментальных, так и прикладных. Ниже сформулированы наиболее интересные и перспективные направления, которые уместно решать в русле экологии импактных регионов. Именно в рамках этих направлений должны быть получены ответы на те вопросы, без решения которых создание теории изменений экосистем вряд ли возможно.

Фундаментальные:

1. Поиск конкретных механизмов устойчивости популяций и экосистем.
2. Анализ закономерностей адаптации биоты к токсической нагрузке на разных уровнях организации.
3. Оценка соотношения разных составляющих – упругости и эластичности – в общей устойчивости популяций и экосистем.
4. Анализ физиологических, биохимических и этологических причин чувствительности или толерантности видов, надвидовых таксонов и экологических групп.
5. Анализ причин различий лабораторных токсикологических экспериментов и натуральных наблюдений.
6. Оценка роли гетерогенности природных популяций и неоднородности среды обитания в реакции биоты на загрязнение.
7. Разделение прямого токсического действия и опосредованных изменений среды обитания.
8. Установление причинно-следственных связей в реакции экосистем на загрязнение.
9. Анализ природно-техногенных аналогий.

Прикладные:

1. Разработка новых методов диагностики нарушений, биотестирования и мониторинга. Поиск чувствительных биоиндикаторов, выбор наиболее информативных показателей изменений популяций и экосистем.
2. Экологическое нормирование нагрузок (нахождение величин критических токсических нагрузок, разработка экологических нормативов загрязнения природных экосистем).
3. Параметризация и верификация различных математических моделей для целей прогнозирования.
4. Картирование зон поражения. Сопряжение данных аэрофотосъемки и наземных наблюдений. Разработка систем поддержки управляющих решений в области природопользования.
5. Разработка и проверка работоспособности методов экономической оценки ущерба природным комплексам от загрязнения.

6. Поиск устойчивых видов (экотипов), перспективных для рекультивации загрязненных территорий.

Заключение

В настоящей работе была сделана попытка обоснования целесообразности выделения нового научного направления – экологии импактных регионов. Были сформулированы представления об объектах и конечной цели исследований, дана краткая оценка современного состояния проблемы, концептивно изложен современный уровень знаний и намечены направления дальнейшего поиска.

Основной вывод работы заключается в следующем: если в качестве «сверхзадачи» ставить целью создание теории изменений экосистем, подверженных загрязнению от точечных источников эмиссии поллютантов, то на настоящий момент мы очень далеки от ее достижения. Вероятно, данный вывод звучит странно на фоне почти бесконечного количества «антропогенных» работ, но мы пока слишком мало, слишком поверхностно, слишком неточно знаем о реакции экосистем, чтобы всерьез говорить о создании такой теории. Но если явно не формулировать «сверхзадачу», накопление бесконечной череды разрозненных фактов будет лишь добавлять новые камешки к случайной мозаике, из которой вряд ли возникнет сама по себе целостная картина.

Работа завершена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 01-05-65258).

ЛИТЕРАТУРА

- Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / Под ред. Р. Шуберта. М.: Мир, 1988. 350 с.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
- Егоров Ю. А. Экология регионов атомных станций – новое научное направление экологии // Экология регионов атомных станций. М., 1994. Вып. 2. С. 5–29.
- Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997. 285 с.
- Козлов М. В. Влияние антропогенных факторов на популяции наземных насекомых // Итоги науки и техники. Сер. Энтомология. Т. 13. М., 1990. 192 с.
- Смит У. Х. Лес и атмосфера. Взаимодействие между лесными экосистемами и примесями атмосферного воздуха. М.: Прогресс, 1985. 429 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Нижегородская государственная социально-педагогическая академия

Ученые записки НТГСПА

2004

**Материалы VI Всероссийского популяционного семинара
«Фундаментальные и прикладные проблемы
популяционной биологии»**

Нижний Тагил
2004

УДК 009 (05)

ББК 954

Н607

Печатается по решению Ученого Совета НТГПИ-НТГСПА (протокол № 1 от 26.01.2001 г.)

Н607 Нижнетагильская государственная социально-педагогическая академия.

Ученые записки. Материалы VI Всероссийского популяционного семинара / Отв. ред. Т. В. Жуйкова. Нижний Тагил, 2004. 203 с.

ISBN 5-8299-0010-6

Печатается при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 02-04-58119)

Редколлегия серии «Ученые записки»:

Смирнов В. И., главный редактор, ректор НТГСПА; Ноздрин С. А., зам. гл. редактора, проректор по научной работе НТГСПА; Букина Н. Е., канд. пед. наук; Трофимов В. А., канд. хим. наук; Уткин А. В., канд. пед. наук; Шапко В. Т., докт. социол. наук

Редколлегия выпуска:

Глов Н. В., д-р биол. наук, профессор, Марийский государственный университет; Безель В. С., д-р биол. наук, профессор, Институт экологии растений и животных УрО РАН; Жуйкова Т. В., канд. биол. наук, доцент, Нижнетагильская государственная социально-педагогическая академия

Рецензенты:

Воробейчик Е. Л., канд. биол. наук, старший научный сотрудник, Институт экологии растений и животных УрО РАН;

Смирнов Н. Г., д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАН, Институт экологии растений и животных УрО РАН

Настоящий выпуск «Ученых записок НТГСПА» включает материалы VI Всероссийского популяционного семинара, проходившего на базе Нижнетагильского государственного педагогического института 2–6 декабря 2002 г. Работы посвящены проблемам внутривидового биоразнообразия, поливариантности развития, генетической гетерогенности и генетических барьеров, исследованиям онтогенеза и популяционной структуры видов растений, животных, а также историческим и медицинским аспектам демографии человека. Обсуждаются проблемы экологического образования и воспитания.

Сборник адресован биологам и экологам широкого профиля, аспирантам и студентам биологических факультетов университетов, педагогических, сельскохозяйственных, медицинских институтов, учителей школ.

ISBN 5-8299-0010-6

© Нижнетагильская государственная социально-педагогическая академия, 2004