

УДК 595.762.12:591.5 (477.63)

© 2007 г. А. М. СУМАРОКОВ, А. В. ЖУКОВ

## ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АГРОБИОГЕОЦЕНОЗОВ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ПЕСТИЦИДНЫХ НАГРУЗОК В УКРАИНЕ

Антропогенное воздействие на биосферу носит глобальный характер, особенно в связи с производственной деятельностью человека. Наряду с промышленностью, в качестве мощного фактора воздействия выступает и сельское хозяйство. В последнем случае за нарушение экологического равновесия ответственны не только большие масштабы распашки природных биогеоценозов и использование их под выращивание сельскохозяйственных культур, но и применение в растениеводстве широкого ассортимента отравляющих веществ в виде пестицидов, приводящих к известным негативным последствиям. Пестицидный стресс выступает в данном случае в качестве экологического фактора, который влечет за собой существенные перестройки в структуре всех компонентов биогеоценозов и приводит к ослаблению их экологического потенциала. При этом наблюдается значительное обеднение сообществ, сокращение числа образующих их видов на всех трофических уровнях во всех трофических цепях. В результате такого воздействия пестицидов на экосистемы разных уровней, в них происходит нарушение авторегуляционных процессов, возникают вспышки массового размножения фитофагов, причём часто со сменой доминантов, в сторону видов, которые раньше являлись второстепенными вредителями (Козлов, 1987; Тропин, 1964). При всём том, что широкомасштабное и порой бесконтрольное применение химических препаратов обостряет экологическую обстановку в природе, несмотря на нежелательные последствия, происходящие после применения токсикантов, во многих странах увеличивается их производство и использование. Поэтому проблема поиска путей нормализации экологического равновесия в условиях интенсивного антропогенного воздействия является важным аспектом рационального природопользования, охраны окружающей среды и здоровья человека.

Согласно статистическим данным, за последние 10–12 лет, в силу сложившихся в нашей стране определенных экономических трудностей, объём применения пестицидов уменьшился более чем в 10 раз по сравнению с предыдущим периодом. Создавшиеся условия позволили впервые провести уникальный «эксперимент» по оценке изменений, произошедших в биогеоценозах исследуемого региона, на фоне значительного снижения уровня пестицидной нагрузки на них.

Авторами данной работы сделана попытка провести ревизию существующих представлений о функциональных особенностях агробиогеоценозов на основе анализа полученных многолетних данных на примере реакции одной из наиболее многочисленных групп — отряда жесткокрылых (Coleoptera) на уменьшение пестицидного стресса. Но установленные закономерности могут быть распространены и на другие компоненты биоценозов, поскольку, по мнению М. С. Гилярова (1960), для характеристики целых сообществ правомочно использовать результаты изучения их части.

Основной целью исследований было изучить характер реакции имаго жесткокрылых на уменьшение пестицидной нагрузки в степной зоне Украины и на её основе проанализировать изменение экологического потенциала исследуемых агробиогеоценозов.

**Место проведения и методика исследований.** Настоящая работа представляет собой итог исследований, охватывающих период с 1983 по 2005 гг. Наиболее показательными для характеристики уменьшения уровня пестицидного воздействия на биогеоценозы были периоды: 1-й — с 1983 по 1989, характеризующийся интенсивным применением пестицидов, и 2-й — с 1999 по 2005 гг., в котором произошло значительное уменьшение количества ядохимикатов. Указанные периоды были взяты за основу при изложении материалов настоящей работы. Многолетние стационарные исследования проведены на Синельниковской селекционно-опытной станции Института зернового хозяйства УААН, расположенной в Днепропетровской области. Дополнительно материал собирался в Кировоградской, Запорожской, Херсонской, Николаевской и Одесской областях. Обследованию подлежали агрофитоценозы *Triticum vulgare* Host. (озимой пшеницы), *Hordeum sativum* L. (ярового ячменя), *Pisum sativum* L. (гороха), *Zea mays* L. (кукурузы), *Helianthus annuus* L. (подсолнечника) и *Medicago sativa* L.

**Sumarokov A. M.** Sinelnikovo Experimental Selection Station of Institute for Grain Farming of UAAS,

P. O. «Rayevka», Sinelnikovskiy Rayon, Dnepropetrovskaya Oblast, 52523, UKRAINE; e-mail: col@sin.net.ua

**Zhukov A. V.** Dnepropetrovsk National University, ul. Nauchnaya, 13, Dnepropetrovsk, 49050, UKRAINE;

e-mail: zhukov\_dnepr@rambler.ru

(люцерны), входящие в состав целостного агробиогеоценоза. Варианты при исследовании агрофитоценозов служили производственные посевы культур, площадью 50–150 га, а в отдельных случаях площадь посевов была меньшей, но не менее 3 га. Сбор и фиксация жуков проводились по общепринятым методикам (Гиляров, 1941, 1965; Кудрин, 1965; Методические ..., 1976; Скугравы, Новак, 1961; Фасулати, 1971). Основным методом учёта были почвенные ловушки Барбера без фиксатора. Ловушки выставлялись в линию в количестве 5–10 штук на расстоянии 20–25 м друг от друга от границы вглубь биоценоза. Полученные количественные данные в дальнейшем пересчитывались на 10 ловушко-суток. Извлечение насекомых из ловушек проводили регулярно с интервалом 7–10 суток, но иногда из-за дождей или по другим причинам — через 2–3 недели, одновременно во всех исследуемых биоценозах в течение одних суток. Собранных жуков замаривали в эксикаторе с использованием уксусно-этилового эфира, после чего отмывали в воде, высушивали и помещали на ватные энтомологические матрасики для дальнейшей работы по определению их видовой принадлежности. Учёты проводили на протяжении всего периода вегетации культур.

При оценке видového сходства использовался коэффициент Соренсена (Уиттекер, 1979). Виды, обилие которых превышало 5 % от числа пойманных экземпляров, считались массовыми, от 0,1 до 5 % — обычными, менее 0,1% — редкими. Для определения гирропреферендума насекомых использовали работы Т. Е. Россолимо и Л. Б. Рыбалова (1979), А. В. Пучкова (1990).

Статистическая обработка данных проведена с использованием t-критерия Стьюдента (Доспехов, 1979). При математической интерпретации количественных показателей динамики жуков из различных трофических групп в разные периоды исследований была использована концепция Лотки–Вольтера (Chen, Cohen, 2001), построенная на основе регрессионного анализа. Основная часть математической и статистической обработки данных выполнена с использованием пакета программ Microsoft Excel 97.

**Результаты и обсуждение.** По определению М. С. Гилярова (Тишлер, 1971: С. 3–8), биоценоз можно охарактеризовать как совместную встречаемость организмов, способных обитать в данных условиях и образующих взаимосвязанные комплексы, основанные, в первую очередь, на пищевых отношениях. Такая совокупность организмов либо складывается исторически, либо закономерно возникает на основе уже сложившихся комплексов организмов при тех изменениях биотических и абиотических факторов среды, которые вызываются внешними для данного биоценоза условиями, в частности, антропогенной деятельностью. Одними из наиболее постоянных компонентов, характеризующих степень антропогенного воздействия на агроценозы, является взрыхленное состояние почвы и выращивание определенного, хотя и довольно разнообразного для различных регионов набора культурных растений. Кроме этого, следует указать на использование для интенсификации сельскохозяйственного производства различных форм пестицидов.

Биоразнообразие жесткокрылых и других насекомых в агроценозах сформировалось в результате действия естественного отбора (Григорьева, 1962, 1970; Григорьева, Жаворонкова, 1973). В создавшихся экологических условиях наиболее приспособленные виды жуков стали доминирующими по численности за счёт своей широкой экологической пластичности и приспособленности к обитанию в разрыхленной почве.

В аспекте этого определения можно сформулировать следующее положение: во-первых, культурные ландшафты не возникли извне, а существуют на месте, где ранее находились степные целинные биоценозы. Во-вторых, на протяжении довольно длительного процесса сукцессий в результате антропогенной деятельности произошло приспособление первичных комплексов организмов к новым условиям обитания, в результате чего сложились группировки, являющиеся в известной степени индикаторами новых мест обитания.

На основе анализа результатов проведенных исследований, приходим к выводу, что агробиогеоценоз (АБГЦ) по своей структуре является, несомненно, более сложным образованием, нежели составляющие его отдельные части. Поэтому целостный АБГЦ целесообразно рассматривать не как простую сумму агроценозов отдельных культур, входящих в его состав, а как комплекс взаимосвязанных в едином целом элементов. Об этом свидетельствуют, в частности, данные, касающиеся видového состава жесткокрылых, обитающих в агробиогеоценозе (табл. 1).

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что в АБГЦ обитает большее количество видов жесткокрылых по сравнению с входящими в его состав отдельными элементами.

За весь период исследований в пределах целостного агробиогеоценоза зафиксирован 781 вид жесткокрылых, относящихся к 38 семействам. Среди них по количеству видов доминировали жужелицы (Carabidae) — 245 видов, затем долгоносики (Curculionidae) — 89, стафилиниды (Staphylinidae) — 83, листоеды (Chrysomelidae) — 65, пластинчатоусые (Scarabaeidae) — 55 видов. Значительно уступали им карапузики (Histeridae) — 26 видов, усачи (Cerambycidae) — 24, коровки (Coccinellidae) — 23, чернотелки

(Tenebrionidae) — 18, нарывники (Meloidae) — 17, щелкуны (Elateridae) и мертвоеды (Silphidae) — по 16 видов, скрытники (Lathridiidae) — 14, горбатки (Mordellidae) — 9, быстрянки (Anthicidae), мягкотелки (Cantharidae) и кожееды (Dermestidae) — по 8 видов, малашки (Melyridae) — 7, зерновки (Bruchidae), пилюльчики (Byrrhidae) и блестянки (Nitidulidae) — по 5 видов. Остальные семейства жуков были представлены 1–4 видами.

**Таблица 1.** Процентная доля видов жесткокрылых в структуре целостного агробиогеоценоза

Годы	Всего видов в АБГЦ	Доля видов жуков в отдельных агроценозах от общего числа видов жесткокрылых в АБГЦ, %					
		пшеница	ячмень	горох	кукуруза	подсолнечник	люцерна
1999	151	35,8	29,1	34,4	28,1	27,9	79,5
2000	178	44,4	33,7	36,0	28,1	31,5	83,1
2001	216	69,4	24,5	29,6	21,3	27,3	71,3
2002	162	46,9	37,0	47,5	33,3	28,4	72,8
2003	90	—	46,7	62,2	40,0	38,9	—
2004	192	36,6	24,2	33,0	33,5	28,9	75,3
2005	210	56,7	49,0	42,9	32,4	44,8	89,0
Среднее	185	48,3	34,9	40,8	31,0	32,5	78,5

Важным аспектом познания закономерностей изменения экологического потенциала агробиогеоценоза является изучение экологической структуры жесткокрылых, обитающих в составе исследуемых тестовых агрофитоценозов (табл. 2).

**Таблица 2.** Характеристика экологической структуры жесткокрылых, обитающих в агробиогеоценозах исследуемого региона

Показатели экологической структуры видов жесткокрылых	Агрофитоценозы						Среднее по АБГЦ
	пшеница	ячмень	горох	кукуруза	подсолнечник	люцерна	
	доля в % от общего числа видов в АБГЦ						
<b>Биотопическая приуроченность</b>							
степные	57,4	69,7	62,9	59,6	57,9	53,2	60,1
политопные	29,8	22,4	25,7	30,8	33,3	28,2	28,4
луговые	6,4	3,9	5,7	3,8	5,3	8,9	5,7
степные галофилы	1,1	1,3	1,1	1,9		0,8	1,0
пойменно-лесные	1,1					3,2	0,7
лесные	0,0		1,4	1,9	1,8	1,6	1,1
прибрежные	2,1	1,3	1,4	1,9	1,8	3,2	2,0
<b>Гигропреферendum</b>							
мезофилы	61,7	59,2	60,0	59,6	64,9	65,3	61,7
мезоксерофилы	21,3	28,9	27,1	28,8	26,3	17,7	25,0
ксерофилы	7,4	9,2	8,6	11,5	8,8	6,5	8,7
мезогигрофилы	6,4	2,6	4,3			6,5	3,3
гигрофилы	3,2					4,0	1,2
<b>Условная трофическая группа</b>							
зоофаги	43,6	38,2	38,6	46,2	40,4	52,4	43,2
фитофаги	33,0	34,2	34,3	34,6	29,8	25,8	32,0
сапрофаги	23,4	27,6	27,1	19,2	29,8	21,8	24,8

Анализ данных, приведенных в таблице 2, показывает, что в пределах целостного агробиогеоценоза, также как и в агроценозах отдельных культур, по биотопической приспособленности к условиям местообитаний доминирующее положение занимали жесткокрылые, принадлежащие к степным и политопным элементам, составлявшие в среднем 88,5 % всего количества видов. Из зарегистрированных 29 массовых по плотности видов жуков на долю степных элементов приходилось 14 видов, а политопных — 15. Представители жуков данных биотопических группировок были наиболее приспособленными к обитанию в условиях агроценозов и присутствовали в большом количестве в фитоценозах всех исследуемых агрокультур.

По отношению к режиму увлажнения доминирующее положение среди жесткокрылых занимали виды, принадлежащие к мезофильной (61,7 %) и мезоксерофильной (25,0 %) группам. Из них массовыми по плотности были 15 видов мезофилов и 11 — мезоксерофилов. Анализируя приведенные в таблице данные, приходим к выводу, что две первые группы жуков являются наиболее приспособленными

к обитанию в условиях разрыхленной почвы агроценозов и составляют основу фаунистических комплексов герпетобионтных жесткокрылых в целостном агробиогеоценозе.

По трофической принадлежности среди жесткокрылых, населяющих агробиогеоценоз, по числу видов преобладали зоофаги. Они составляли 43,2 % от всего числа видов жуков, и из 29 массовых по плотности видов жесткокрылых на их долю приходилось 18. К таким зоофагам, прежде всего, принадлежат представители семейства жужелиц: *Bembidion properans*, *Broscus cephalotes*, *Calathus fuscipes*, *Calosoma auropunctatum*, *Harpalus rufipes*, *Microlestes minutulus*, *Poecilus crenuliger*, *P. cupreus*, *P. punctulatus*, *P. sericeus*, *Syntomus obscuroguttatus* и другие. Среди жесткокрылых они являются наиболее постоянными обитателями АБГЦ и жизненный цикл большинства из них практически полностью связан с агроценозами. Из жуков-зоофагов следует также отметить карапузиков *Hister quadrimaculatus* и *Margarinotus bipustulatus*, которые в разные периоды своего жизненного цикла обитают в условиях агрофитоценозов.

На долю фитофагов приходилось 32,0 % от всего видового разнообразия жуков, обитающих в пределах агробиогеоценоза. Вместе с тем, как показал анализ полученных данных, из растительноядных жуков лишь три вида (*Zabrus tenebrioides*, *Anisoplia austriaca* и *Opatrum sabulosum*) были массовыми по численности. Увеличение количества хлебной жужелицы было зафиксировано в агрофитоценозах озимой пшеницы при размещении культуры по стерневым предшественникам, о чем уже было сказано раньше. При смене предшествующей культуры численность жужелицы резко уменьшалась. Хлебный жук-кузья в большой численности появлялся спорадически.

По числу видов группа жуков-сапрофагов составляла 24,8 % от всего количества обычных и массовых по численности видов. Тем не менее, 8 видов жуков-представителей этой трофической группы (*Anthicus hispidus* и *Formicomus pedestris* (Anthicidae), *Aelosomus rossi* (Elateridae), *Onthophagus ovatus* и *O. vitulus* (Scarabaeidae), *Silpha obscura* (Silphidae), *Crypticus quisquilius*, (Tenebrionidae)) в разные периоды исследований были массовыми в условиях агрофитоценозов.

В опубликованных работах были приведены результаты исследований по оценке реакции жесткокрылых на уменьшение пестицидной нагрузки в разные периоды исследований (Сумароков, 2003, 2004, 2005).

Для более предметного представления о размерах уменьшения пестицидных нагрузок в Украине во втором периоде исследований, по сравнению с первым, считаем целесообразным привести статистические данные о динамике объемов химических обработок сельскохозяйственных культур в Украине (табл. 3).

**Таблица 3. Динамика объёмов химических обработок сельскохозяйственных культур в Украине (по материалам Республиканского производственно-научного объединения «Укрсельхозхимия»)**

Годы	Обработано, тыс. га	Годы	Обработано, тыс. га
1983	45679	1999	12137
1984	44598	2000	12436
1985	62022	2001	16812
1986	52934	2002	18458
1987	51224	2003	15385
1988	49450	2004	20538
1989	40173	2005	26900
Всего	346080	Всего	122666
Среднее	51440	Среднее	17524
Кратность обработок	1,86	Кратность обработок	0,54
Среднее с учётом кратности	95678	Среднее с учётом кратности	9473

Переходя к изложению вопроса о влиянии уменьшения пестицидной нагрузки на изменение качественные показателей жесткокрылых, приводим данные, характеризующие изменение количества видов жуков из разных трофических групп за весь период исследований (табл. 4).

Установлено, что во втором периоде исследований количество видов жуков-зоофагов в АБГЦ достоверно возросло по сравнению с первым периодом в 1,9 раза, фитофагов — в 1,8, а сапрофагов — в 1,7. При этом в абсолютных цифрах общее число видов жесткокрылых увеличилось на 84 вида, в том числе зоофагов — на 40, а фитофагов и сапрофагов на 29 и 16 видов соответственно.

При анализе изменений динамической плотности жесткокрылых, наблюдавшихся в целостном агробиогеоценозе, было установлено, что во втором периоде, по сравнению с первым, произошло

существенное увеличение динамической плотности герпетобионтных жесткокрылых из всех трофических групп. Данные о произошедших изменениях отражены на рисунке 1.

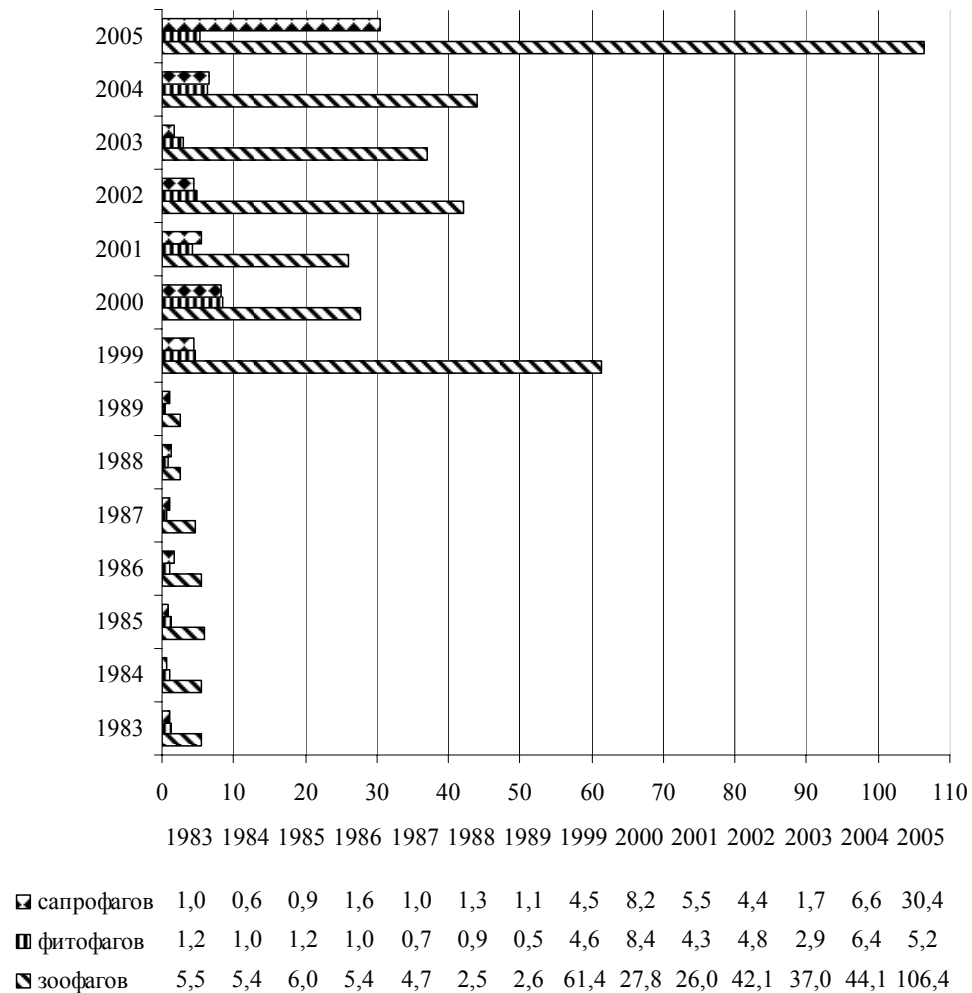
**Таблица 4. Количество видов жесткокрылых в агробиогенозе в разные периоды исследований**

Количество видов	Годы							
	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1983-1989
Всего	87	114	116	113	101	98	80	101
из них: зоофагов	39	49	47	54	40	41	34	43
фитофагов	31	41	45	33	40	34	22	35
сапрофагов	17	24	24	26	21	23	24	23

Количество видов	Годы						
	1999	2000	2001	2002	2004	2005	1999-2005
Всего	151	178	216	162	192	210	185
из них: зоофагов	73	72	81	65	98	106	83
фитофагов	50	69	84	62	57	61	64
сапрофагов	28	37	51	35	37	43	39

**Примечания.** Для зоофагов ( $t_{\phi}=5,34 > t_{st}=3,17$ ), фитофагов ( $t_{\phi}=5,03 > t_{st}=4,59$ ), сапрофагов ( $t_{\phi}=4,60 > t_{st}=4,61$ ) при  $P_{0,01}$ .  
 Во втором периоде исследований данные для 2003 г. не приводятся в связи с гибелью посевов люцерны и пшеницы во время зимовки.



**Рис. 1. Изменение плотности жесткокрылых в целостном агробиогенозе в разные периоды исследований** (для зоофагов ( $t_{\phi}=3,62 > t_{st}=3,17$ ) при  $P_{0,1}$ , фитофагов ( $t_{\phi}=7,25 > t_{st}=4,59$ ) при  $P_{0,01}$ , сапрофагов ( $t_{\phi}=2,15 < t_{st}=2,23$ ) при  $P_{0,5}$ ).

Установлено, что в АБГЦ во втором периоде исследований произошло увеличение динамической плотности всех жесткокрылых в 9,6 раза. В том числе зоофагов — в 10,7 раза, а фитофагов и сапрофагов соответственно в 5,8 и 8,0 раза по сравнению с первым периодом.

Таким образом, следует признать, что основным дестабилизирующим фактором, способным нарушить сложившееся в агробиогенезе экологическое равновесие, является чрезмерное использование различных пестицидов.

Установлено, что агробиогенезы, как целостные природные структуры, подвергающиеся в определённой степени антропогенной нагрузке, способны восстанавливать свой экологический потенциал и обеспечивать относительно стабильное существование элементов системы на уровне динамического равновесия всех трофических групп зооценоза только при условии существенного уменьшения количества применяемых человеком отравляющих химических соединений.

Даже при значительном уменьшении количества пестицидов природные популяции зоофагов, обитающие в агроценозах, самостоятельно регулировали численность вредных насекомых на уровне, меньшем экономических порогов вредоносности. Установлено, что имеющее место увеличение плотности жуков-фитофагов при уменьшении пестицидных нагрузок происходит, главным образом, за счёт видов жуков, питающихся сорной растительностью.

При проведении математического анализа данных, характеризующих параметры изменения экологического потенциала агробиогенеза, были использованы различные индексы количественных изменений, отражающих реакцию системы на разные уровни пестицидных нагрузок.

Экологические системы подвержены воздействию факторов внешней среды. Возвращается система в исходное состояние после пертурбации или нет, характеризуется качественным понятием «стабильность системы». Кроме того, существует количественная характеристика — эластичность системы, измеряющая, как скоро происходит возврат её в исходное состояние после пертурбации (Holling, 1973; Beddington, Free, Lawton, 1976; Harrison, 1979; DeAngelis, 1980; Pimm, 1984.).

Для измерения эластичности экосистем предложено множество индексов (Jordan, Kline, Sasser, 1972; Pimm, Lawton, 1977; DeAngelis, 1980). Наиболее часто встречается и достаточно просто может быть вычислен индекс, который основывается на собственных числах матрицы, описывающей количественную динамику системы вблизи равновесия (Neubert, Caswell, 1997). Рассмотрим линейную систему, которая может представлять линейную систему или линеаризацию нелинейной системы вблизи точки равновесия (1):

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \quad x(0) = x_0 \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет единственное решение:

$$x(t) = e^{At} x_0 \quad (2)$$

Если собственное число матрицы  $A$  является отрицательным, то  $e^{At} \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , а равновесное решение  $x^* = 0$  является асимптотически стабильным.

Ввиду того, что скорость асимптотического уменьшения  $x$  пропорциональна степени  $1/e$  во временном интервале  $-1/\text{Re}(\lambda_1(A))$ , С. Л. Пимм и Дж. Х. Лоутон (Pimm, Lawton, 1977) использовали указанный интервал как меру времени возврата системы в стационарное равновесное состояние. Таким образом, эластичность (Resilience), определенная как:

$$\text{Resilience} \equiv -\frac{1}{\text{Re}(\lambda_1(A))} \quad (3)$$

и является асимптотической аппроксимацией скорости затухания пертурбации линейной системы (1), что свидетельствует о том, что при большей эластичности пертурбации затухают быстрее.

Эластичность, измеренная с помощью наибольшего собственного числа матрицы  $A$  (3), является асимптотическим свойством, которое отражает скорость затухания пертурбации с течением времени. Кратковременное поведение системы сразу после пертурбации при этом игнорируется. Возникает вопрос, отражает ли адекватно асимптотическое поведение ответ на воздействие? Ответом на него следует считать, что ввиду короткой длительности большинства экологических экспериментов быстротечные эффекты при наблюдениях за реакцией экосистем на пертурбации преобладают. Но, быстротечные реакции системы могут быть также важны, как и длительное асимптотическое поведение. Отсюда следует, что даже стабильная эластичная система в первый период после пертурбации может вести себя неоднозначно. Даже если пертурбация со временем затухает, её размер может быстро увеличиваться в начальный период реакции системы. Быстротечные изменения не являются результатом нелинейности системы, хотя нелинейность может усиливать эффект.

Скорость отклонения системы от стационарного состояния вследствие воздействия характеризуется таким понятием, как реактивность. Она может быть вычислена следующим образом (Neubert, Caswell, 1997):

$$\text{Reactivity} = \lambda_1 \frac{(A + A^T)}{2} \quad (4)$$

где  $(A+A^T)/2$  — эрмитова часть матрицы  $A$ . Если  $\lambda_1(A) < 0$ , а  $\lambda_1((A+A^T)/2) > 0$ , то система является устойчивой, но реактивной. Поэтому пертурбации, не столь важно, какими малыми по размерам они есть, прежде чем затихнуть, будут увеличиваться.

Реактивность является мерой поведения системы при  $t \rightarrow 0$  и, таким образом, дополняет эластичность, которая является мерой поведения системы при  $t \rightarrow \infty$ . Если система является реактивной, то после выхода её из равновесного состояния величина отклонения будет увеличиваться. Это отклонение характеризуется максимальной величиной и временем его достижения. На рисунке 2 показано соотношение между основными характеристиками устойчивости системы — эластичностью, реактивностью, максимальной амплитудой отклонения и временем её наступления.

Из рисунка 2 видно, что эластичность и реактивность являются мерами, определяющими амплитуду отклонения системы в неравновесном состоянии. Эластичность численно совпадает с наклоном траектории системы при стремлении времени к бесконечности. Реактивность численно совпадает с наклоном траектории поведения системы при стремлении времени к нулю.

Натуральный логарифм отклонения системы от равновесного состояния  $\rho(t)$  представлен сплошной линией. Наклон кривой  $\ln \rho(t)$  при  $t \rightarrow 0$  есть реактивность системы, изображен на рисунке в виде пунктирной линии слева от изгиба кривой, а наклон кривой  $\ln \rho(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  есть эластичность системы (пунктирная линия справа от изгиба кривой).  $t_{\max}$  и  $\ln \rho_{\max}$  обозначают положение максимального возмущения системы после отклонения её от равновесного состояния.

Для исследования динамики сообщества на предмет устойчивости необходимы следующие этапы. Во-первых, динамика сообщества должна быть описана в терминах дифференциальных уравнений. Во-вторых, на основании системы дифференциальных уравнений строится матрица сообщества (одна либо несколько, в зависимости от числа стационарных состояний). Матрица сообщества составляется из коэффициентов частных производных. Затем из полученных матриц вычисляются критерии устойчивости сообщества, на основании которых делается вывод о характере его устойчивости.

За основу описания динамики сообщества взято уравнение Лотки-Вольтерра, которое в общем имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = x_i (r_i + f(\frac{x}{K}, \dots, x_j)) \quad (5)$$

где  $dx_i/dt$  — скорость изменения популяции (трофической группы),  $x_i$  — плотность популяции (трофической группы),  $r_i$  — максимальная скорость роста,  $K$  — предельная плотность популяции (трофической группы), выше которой скорость роста становится отрицательной,  $f$  — функциональная зависимость количественных изменений показателей популяции (трофической группы) от плотности популяции (трофических групп), входящей в сообщество.

Характер математической формы  $f$  может отражать экологическую специфику взаимодействия, откуда и возникают разновидности уравнения Лотки-Вольтерра. В форме  $f$  можно учесть конкуренцию, хищничество, мутуализм и т. д.

Для описания динамики реального сообщества помимо качественного соответствия математической формы специфике взаимодействия в качестве важного критерия включается требование оптимальности модели. Критерий оптимальности подразумевает некоторое соотношение между точностью описания реальных данных, числом переменных в модели и сложностью их взаимосвязи.

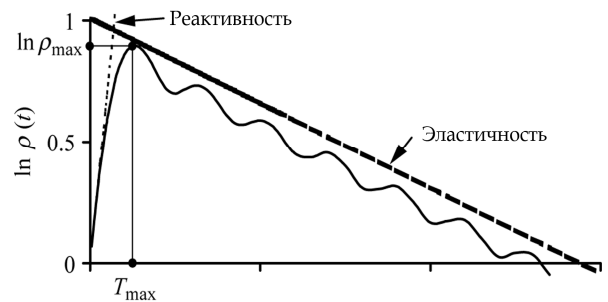


Рис. 2. Динамика системы после выведения из равновесного состояния и характеристики, описывающие устойчивость системы.

Иначе, с увеличением числа предикторов и сложности их взаимосвязи можно получить хорошее формальное описание явления, но такое решение будет сложно интерпретировать качественно.

Для двух периодов наблюдений (1 — интенсивное применение пестицидов и 2 — уменьшение пестицидных нагрузок) расчеты были проделаны в целом, без учёта специфики сельхозкультур, так как объем собранного материала позволяет остановиться только на таком уровне детализации.

Для описания количественной динамики трофической структуры сообщества герпетобионтных жесткокрылых в первом периоде достаточными оказались каскадные модели Лотки-Вольтерра (Chen, Cohen, 2001):

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left( r_i + \sum_{j=1}^n P_{ij} x_j \right) \quad (6)$$

где  $P_{ij}$  — коэффициенты взаимодействия между видами, которые формируют матрицу сообщества. Результаты регрессионного анализа, с помощью которого установлены значения соответствующих коэффициентов, представлены в таблице 5.

**Таблица 5. Регрессионный анализ зависимости скорости изменения обилия трофических групп от трофической структуры сообщества герпетобионтных жесткокрылых в АБГЦ в первом периоде (1983–1989 гг.)**

Зависимая переменная	$\Delta ZF$ (зоофаги)		$\Delta SF$ (сапрофаги)		$\Delta FF$ (фитофаги)	
	Оценка	р-уровень	Оценка	р-уровень	Оценка	р-уровень
ZF	-1,08	0,011	-1,99	0,107	-1,78	0,009
SF	0,86	0,036	-4,22	0,002	-1,13	0,047
FF	0,22	0,045	2,13	0,037	-0,66	0,015
r	0,40	0,048	1,77	0,013	1,62	0,000

Система дифференциальных уравнений А имеет решение: (0,64; 0,26; 0,28). Матрица Якоби (матрица сообщества) имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} -1,08 & 0,86 & 0,22 \\ -1,99 & -4,22 & 2,13 \\ -1,78 & -1,13 & -0,66 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Максимальное собственное значение матрицы А равно  $-1,47 + 1,239i$ . Максимальное собственное число эрмитовой части матрицы А равно 0,064. Из этого следует, что сообщество герпетобионтных жесткокрылых в АБГЦ в первом периоде исследований характеризуется устойчивым стационарным состоянием, которое обладает свойством реактивности. При выведении системы из равновесного состояния возврат в него осуществляется по колебательной траектории. На начальном этапе траектория системы значительно отклоняется от стационарного состояния, и только спустя некоторый промежуток времени происходит затухание динамики. Устойчивое стационарное состояние системы характеризуется следующими показателями динамической плотности жесткокрылых из разных трофических групп: зоофаги — 4,36, сапрофаги — 1,82 и фитофаги — 1,91 экз./ловушко-суток.

Динамика сообщества жесткокрылых в АБГЦ во втором периоде исследований может быть описана более сложными уравнениями, чем в первый период. Динамика зоофагов описывается уравнением вида:

$$\frac{dZF}{dt} = ZF(r_{ZF} + a1 \times ZF + a2 \times ZF^2 + a3 \times SF + a4 \times FF) \quad (8)$$

где  $dZF/dt$  — скорость изменения динамической плотности зоофагов, ZF, SF, FF — плотность жуков из разных трофических групп;  $a1, a2, a3, a4$  — регрессионные коэффициенты;  $r_{ZF}$  — свободный член (численно равен скорости роста в уравнении Лотки-Вольтера). Предельную плотность зоофагов  $K_{ZF}$  можно вычислить следующим образом:

$$K_{ZF} = -\frac{1}{a1} \quad (9)$$

Динамика плотности жуков-сапрофагов описывается уравнением вида:

$$\frac{dSF}{dt} = SF(r_{SF} + \frac{a1}{ZF} + a2 \times SF^2 + a3 \times SF + \frac{a4}{FF}) \quad (10)$$



Предельную плотность сапрофагов  $K_{SF}$  можно вычислить следующим образом:

$$K_{SF} = -\frac{r_{SF}}{a3} \quad (11)$$

Динамика плотности фитофагов описывается уравнением вида:

$$\frac{dFF}{dt} = FF(r_{FF} + \frac{a1}{ZF} + a2 \times FF^2 + \frac{a3}{SF} + a4 \times FF) \quad (12)$$

Предельную численность фитофагов  $K_{FF}$  можно вычислить следующим образом:

$$K_{FF} = -\frac{r_{FF}}{a4} \quad (13)$$

Результаты регрессионного анализа, который позволил установить значение соответствующих коэффициентов, описывающих динамику сообщества герпетобионтных жесткокрылых в целостном агробиогеоценозе в условиях региона во втором периоде, представлены в таблице 6.

**Таблица 6. Регрессионный анализ зависимости скорости изменения обилия трофических групп от трофической структуры сообщества герпетобионтных жесткокрылых в АБГЦ во втором периоде (1999–2005 гг.)**

$\Delta ZF$ (зоофаги)			$\Delta SF$ (сапрофаги)			$\Delta FF$ (фитофаги)		
Переменная	Оценка	p-уровень	Переменная	Оценка	p-уровень	Переменная	Оценка	p-уровень
ZF	-1,52	0,019	1/ZF	-0,26	0,051	1/ZF	-0,42	0,022
ZF <sup>2</sup>	0,65	0,036	SF <sup>2</sup>	1,06	0,007	FF <sup>2</sup>	2,46	0,020
SF	0,87	0,350	SF	-2,90	0,037	1/SF	0,04	0,000
FF	-0,61	0,036	1/FF	-0,38	0,015	FF	-3,01	0,048
$r_{ZF}$	0,96	0,048	$r_{SF}$	2,32	0,084	$r_{FF}$	1,10	0,019

Система дифференциальных уравнений в данном случае имеет три решения: (1,34; 0,80; 0,79), (0,51; 0,12; 0,26), (1,36; 0,57; 0,46), а линеаризация системы вблизи равновесных состояний дает три матрицы Якоби:

$$B1 = \begin{pmatrix} 0,23 & 0,87 & -0,61 \\ 0,14 & -1,20 & 0,61 \\ 0,24 & -0,09 & 0,46 \end{pmatrix}, \quad B2 = \begin{pmatrix} -0,86 & 0,87 & -0,16 \\ 1,01 & -2,64 & 5,66 \\ 1,63 & -2,73 & -1,74 \end{pmatrix}, \quad B3 = \begin{pmatrix} 0,24 & 0,87 & -0,61 \\ 0,14 & -1,70 & 1,77 \\ 0,23 & -0,12 & -0,73 \end{pmatrix}.$$

Максимальное собственное значение матрицы B1 равно  $0,34+0,245i$ , матрицы B2 —  $0,39+4,022i$ , а матрицы B3 —  $0,33+0,374i$ . Максимальное собственное число эрмитовой части матрицы B2 равно 0,24. Таким образом, на основании данных приведенных матриц становится очевидным, что сообщество герпетобионтных жесткокрылых в условиях целостного АБГЦ во втором периоде исследований при уменьшении пестицидного пресса характеризуется устойчивым стационарным состоянием, которое обладает свойством реактивности. Такого состояния сообщество достигает при следующих показателях динамической плотности жуков из разных трофических групп: зоофаги — 3,22, сапрофаги — 1,32, фитофаги — 1,82 экз./ловушко-суток.

Мы видим, что трофическая структура жесткокрылых в агробиогеоценозе в стационарных состояниях в сравниваемые периоды интенсивного применения пестицидов и после существенного уменьшения количества отравляющих веществ характеризуется весьма подобными значениями плотности зоофагов, сапрофагов и фитофагов. Так, трофическая структура сообщества жесткокрылых в первом периоде исследований несколько более упругая ( $-\text{Re}(\lambda_A) = 0,47$ ), чем во втором периоде ( $-\text{Re}(\lambda_B) = 0,39$ ). Это значит, что применение пестицидов приводит к более быстрому затуханию отклонения плотности герпетобионтов от стационарного состояния. Однако, для второго периода характерна значительно большая реактивность трофической структурой герпетобия ( $H(B) = 0,24$ ), чем для первого ( $H(A) = 0,064$ ).

Изменение пестицидной нагрузки нашло свое отражение не только в свойствах сообщества жесткокрылых вблизи стационарного состояния, но и в динамических свойствах. Установлено, что в первом периоде исследований скорость роста плотности (коэффициент  $r$  в уравнении Лотки-Вольтерра) трофических групп зоофагов и сапрофагов выше, а фитофагов — ниже, чем во втором периоде. Граничная плотность трофических групп (уровень численности, выше которого скорость роста группы отрицательна, коэффициент  $K$  в уравнении Лотки-Вольтерра) зависит от наличия интенсивности пестицидной нагрузки. Так, в условиях уменьшения пестицидного пресса, по сравнению с масштабным

применением химических препаратов, этот показатель возрастает для зоофагов (4,28 против 2,37 экз./ловушко-суток) и для сапрофагов (6,32 против 2,62 экз./ловушко-суток). Для фитофагов наблюдается обратная тенденция — 2,33 экз./ловушко-суток во втором периоде против 268,6 в первом. Необходимо отметить, что коэффициенты  $r$  и  $K$  в уравнении Лотки–Вольтерра указывают на потенциал скорости роста ( $r$ ) и на потенциал экологической емкости ( $K$ ) сообществ герпетобионтных жесткокрылых, принадлежащих к разным трофическим группам. Потенциал в данном контексте является наибольшей величиной, которая может быть достигнута.

На основании данных, полученных в результате проведенного математического анализа, можно утверждать, что уменьшение количества пестицидов приводит к восстановлению экологического потенциала агробиогеоценоза, который формируется на сельскохозяйственных угодьях. Показателем данного процесса служит увеличение потенциала экологической емкости зоофагов в 1,8 раза, сапрофагов — в 2,4 раза, с одновременным уменьшением аналогичных показателей для фитофагов в 115,3 раза. Чрезмерное же применение пестицидов является мощным фактором воздействия на герпетобий. Несмотря на то, что пестицидный контроль стабилизирует динамику сообщества, увеличивает его упругость и снижает эластичность, при этом разрушаются естественные механизмы биогеоценотического контроля динамики трофической структуры. Наиболее чувствительными к пестицидному воздействию являются хищники и сапрофаги. Поэтому, при значительном снижении регулирующего влияния численности растительноядных насекомых природными популяциями энтомофагов в условиях интенсивных пестицидных нагрузок, потенциал роста фитофагов многократно увеличивается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гиляров М. С.* Методы количественного учёта почвенной фауны // Почвоведение. — 1941. — № 4. — С. 48–77.  
*Гиляров М. С.* Почвенные беспозвоночные как фактор плодородия почвы // Ж. общ. биологии. — 1960. — Т. 21, № 2. — С. 81–88.  
*Гиляров М. С.* Зоологический метод диагностики почв. — М.: Наука, 1965. — 275 с.  
*Григорьева Т. Г.* Некоторые итоги и перспективы изучения вредителей зерновых культур и борьба с ними при освоении целины // Зоол. ж. — 1962. — Т. 41, вып. 1. — С. 3–17.  
*Григорьева Т. Г.* Возникновение процессов саморегуляции в агробиоценозе при длительной монокультуре // Энтومол. обозрение. — 1970. — Т. XLIX, вып. 1. — С. 10–22.  
*Григорьева Т. Г., Жаворонкова Т. Н.* Роль антропогенных и природных факторов в формировании трофической структуры пшеничного агробиоценоза // Энтومол. обозрение. — 1973. — Т. LI, вып. 3. — С. 489–507.  
*Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). — М.: Колос, 1979. — 416 с.  
*Козлов М. В.* Ответные реакции популяций насекомых на антропогенные воздействия: Препринт / ИЛИД СО АН СССР. — Красноярск, 1987. — 60 с.  
*Кудрин А. И.* К вопросу о применении земляных ловушек для изучения распределения и взаимодействия элементов энтомофауны на поверхности почвы // Тр. Всесоюз. энтомот. о-ва. — М.; Л., 1965. — Т. 50. — С. 272–290.  
**Методические указания по выявлению и учету численности энтомофагов и вредителей сельскохозяйственных культур** / Сост. В. А. Шапиро, В. А. Щепетьникова. — М.: Колос, 1976. — 16 с.  
*Пучков А. В.* Жесткокрылые (Coleoptera) пшеничного поля юго-запада степной зоны Европейской части СССР // Энтومол. обозрение. — 1990. — Т. LXIX, вып. 3. — С. 538–549.  
*Россолимо Т. Е., Рыбалов Л. Б.* Термо- и гигропреферендумы некоторых почвенных беспозвоночных в связи с их биотопическим распределением // Зоол. ж. — 1979. — Т. 58, вып. 12. — С. 1802–1810.  
*Скургавы В., Новак К.* Изучение энтомоценозов полевых культур // Энтومол. обозрение. — 1961. — Т. XL, вып. 4. — С. 807–814.  
*Сумароков А. М.* Изменение видового состава и трофической структуры колеоптерофауны при уменьшении пестицидной нагрузки на биоценозы степной зоны Украины // Изв. Харьков. энтомот. о-ва. — 2002 (2003). — Т. X, вып. 1–2. — С. 160–174.  
*Сумароков А. М.* Биоценологические аспекты изменения фауны жесткокрылых (Coleoptera) степной зоны Украины при уменьшении пестицидной нагрузки на биоценозы // Экология и ноосферология. — 2004. — Т. 15, № 1–2. — С. 77–83.  
*Сумароков А. М.* Влияние пестицидов на популяции жесткокрылых (Coleoptera) биоценозов степной зоны Украины // Науч. ведомости БелГУ. Сер. «Экология». — Белгород, 2005. — № 1 (21), вып. 3. — С. 26–30.  
*Тишлер В.* Сельскохозяйственная экология. — М.: Колос, 1971. — 455 с.  
*Тропин И. В.* Пути сохранения энтомофагов при химической борьбе с вредителями леса // Исследования по биометоду борьбы с вредителями сельского и лесного хозяйства. — Новосибирск, 1964. — С. 195–198.  
*Уиттекер Р.* Сообщества и экосистемы. — М.: Прогресс, 1980. — 320 с.  
*Фасулати К. К.* Полевое изучение наземных беспозвоночных. — М.: Высшая школа, 1971. — 424 с.  
*Beddington J. R., Free C. A., Lawton J. H.* Concepts of stability and resilience in predator-prey models // J. Anim. Ecol. — 1976. — Vol. 45. — P. 791–816.  
*Chen X., Cohen J.* Transient dynamic and food-web complexity in the Lotka-Volterra cascade model // Proc. Roy. Soc. London. — 2001. — Vol. 268. — P. 869–867.  
*DeAngelis D. L.* Energy flow, nutrient cycling, and ecosystem resilience // Ecology. — 1980. — Vol. 61. — P. 764–771.  
*Harrison G. W.* Stability under environmental stress: resistance, resilience, persistence, and variability // Am. Naturalist. — 1979. — Vol. 113. — P. 659–669.  
*Holling C. S.* Resilience and stability of ecological systems // Annu. Rev. Ecol. Syst. — 1973. — Vol. 4. — P. 1–23.  
*Jordan C. F., Kline J. R., Sasser D. S.* Relative stability of mineral cycles in forest ecosystems // Am. Naturalist. — 1972. — Vol. 106. — P. 237–253.

*Neubert M. G., Caswell H.* Alternatives to resilience for measuring the responses of ecological systems to perturbation // *Ecology*. — 1997. — Vol. 78 (3). — P. 653–665.

*Pimm S. L.* The complexity and stability of ecosystems // *Nature*. — 1984. — Vol. 307. — P. 321–326.

*Pimm S. L., Lawton J. H.* Number of trophic levels in ecological communities // *Nature*. — 1977. — Vol. 268. — P. 329–331.

*Институт зернового хозяйства УААН,  
Днепропетровский национальный университет*

Поступила 17.03.2007

UDC 595.762.12:591.5 (477.63)

**A. M. SUMAROKOV, A. V. ZHUKOV**

**GROUND OF RENEWAL OF ECOLOGICAL POTENTIAL  
OF AGROBIOGEOCENOSES AT DIMINISHING  
OF PESTICIDAL LOADINGS IN UKRAINE**

*Institute for Grain Farming of Ukrainian Academy of Agrarian Sciences  
Dnepropetrovsk National University*

SUMMARY

The change of ecological potential of agrocoenoses is in-process analysed at diminishing of the pesticidal loadings in the conditions of Ukraine. On the example of reaction of beetles on diminishing of pesticidal press it is routined that there is renewal of potential in the created terms that is confirmed by the increase of specific variety of beetles and their dynamic closeness.

2 figs, 6 tabs, 29 refs.