

**С.П. Жуков**

## **К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОСТИ ФИТОЦЕНОЗОВ В ХОДЕ ИХ РАЗВИТИЯ НА ОТВАЛАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

сукцессия, фитоценоз, породные отвалы, организация, устойчивость

### **Введение**

Одной из основных проблем современного человечества является ухудшение состояния окружающей среды, приобретающее в последние десятилетия глобальный характер. Большое значение при этом имеет восстановление биогеоценотического покрова на промышленно трансформированных землях, возвращение их в биогеохимические циклы биосферы, которая дестабилизируется из-за их нарушения. Поэтому вопросы рекультивации нарушенных территорий, ликвидации вредного влияния отходов производства, в том числе породных отвалов угольных шахт, давно уже из просто актуальных перешли в категорию задач, решения которых обеспечивают существование и стабильность развития всех социальных систем, в том числе и в Украине [5, 6]. Всего в Украине только под открытыми разработками и шахтами находится 154 000 га земель, или 0,3 %, а под транспортными сооружениями 491 000 га, или 0,8 % всей территории [2]. Поэтому уничтожение растительного покрова на таких значительных территориях ведет к накоплению углекислого газа в атмосфере с последующими изменениями климата [8].

Для решения этой проблемы необходимо как изменение общественного сознания, что обеспечит внимание органов управления и соответствующее финансирование, так и широкое проведение собственно фиторекультивационных работ, восстановление близкого к природному устойчивого растительного покрова, что предполагает сравнение уровня организации сообществ до и после рекультивации, оценку изменения организации фитоценозов в ходе их развития на нарушенных промышленностью территориях.

### **Цель и задачи исследований**

Цель нашей работы – выявление изменения организации фитоценозов в ходе их динамики. При этом ставятся задачи: оценка уровня организации фитоценозов техногенных территорий на основе их системных характеристик; поиск способов оценки устойчивости таких фитоценозов на разных этапах их развития.

### **Объекты и методы исследования**

Объектом исследования служили фитоценозы на породных отвалах угольных шахт Донбасса, изученные нами в 1996–2005 гг., по описаниям которых методом композиционной ординации построен ценохроноклин, отражающий последовательность их сукцессионного развития [3, 4].

В качестве параметров, по которым можно оценивать изменение организации и устойчивости фитоценозов, можно использовать видовой состав, первичную продукцию, урожай на корню и др., но в связи с некоторой односторонностью применения отдельных таких параметров, лучше обратиться к кибернетическому рассмотрению систем для выбора интегральных параметров. Каждая система представлена вещественной, энергетической и информационно-организационной составляющими [1]. И устойчивость системы, как следствие её саморегуляции, в наибольшей степени должна быть связана с её организацией, а не с веществом и энергией, которые в основном учитываются вышеуказанными параметрами. Для оценки уровня организации фитоценозов с системных позиций использовали такие характеристики: индекс Шеннона (Шеннона-Уивера) (H), сложность ( $H_m$ ) и вычисляемый на их основе показатель организации (O) [1].

В кибернетике организация определяется через неопределенность системы, то есть ее энтропию, с помощью формулы Шеннона, по которой определяется и соответствующий индекс разнообразия для фитоценозов:

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i * \ln p_i \quad (1)$$

где  $p_i$  – доля обилия отдельных видов в суммарном обилии,  $S$  – количество видов, видовое богатство,  $H$  – индекс разнообразия Шеннона.

При равновероятности состояний системы ее неопределенность максимальна и равна сложности:

$$H_m = \log S, \quad (2)$$

где,  $S$  – видовое богатство,  $H_m$  – сложность системы.

При нарушении равновесия состояний системы ее неопределенность уменьшается, что и связывают с увеличением организации системы:

$$O = H_m - H, \quad (3)$$

где  $H$  – индекс разнообразия Шеннона,  $H_m$  – сложность системы.

Следовательно, организация системы равна разнице максимальной и текущей неопределенностей системы. Фёрстер предложил также показатель относительной организации системы [1], который позволяет сравнивать между собой различные системы:

$$R_F = 1 - H/H_m = (H_m - H)/H_m, \quad (4)$$

где  $R_F$  – показатель относительной организации системы по Фёрстеру,  $H$  – индекс разнообразия Шеннона,  $H_m$  – сложность системы.

Для расчета средних значений индекса Шеннона и видового богатства сообществ использовали по 30 геоботанических описаний растительных группировок, отнесенных к первой (I) и третьей (III) стадиям сукцессии растительности, и по 60 описаний группировок в начале (IIIa), середине (IIIb) и конце (IIIc) второй стадии сукцессии, наиболее представленной в растительности отвалов, а также обобщенные данные по всем 180 описаниям для второй (II) стадии. Значения индексов вычисляли для каждого описания и затем усредняли на исследуемых интервалах ценохроноклина.

### Результаты исследований и их обсуждение

Исходя из параметра организации системы, можно оценивать устойчивость биосистем, таких как биогеоценоз или фитоценоз, как способность не снижать своей организации при функционировании и развитии или возвращаться к исходному уровню после нарушающих воздействий.

Занос диаспор новых видов (в пределах определенного количества) – нормальный фактор влияния флористического окружения в любом сообществе. Появление в структуре фитоценозов новых видов – особенность их сукцессионной динамики, которая неизбежна при отсутствии сформированного «климаксного эдафотоп», без которого не будет устойчивым даже набор видов климаксных сообществ. Поэтому такая возможность динамики сообществ должна быть учтена при оценке степени организации и устойчивости фитоценозов.

Учитывая принцип адекватности [1], во главу угла при определении устойчивости ценологических систем следует поставить, возможно, адекватность организации этих систем (фитоценоза) и их среды, но для рассматриваемого случая (породные отвалы шахт) заметим, что в динамике техногенных экотопов обычно прослеживается постепенное повышение организации такого компонента биогеоценоза, как эдафотоп, при отсутствии направленных изменений или незначительном дрейфе по другим компонентам.

Практически, если рассматривать особь вида как состояние системы, то неопределенность системы превращается в индекс разнообразия Шеннона, от которого можно перейти к выше-

приведенным формулам. Но как состояние фитоценоза можно рассматривать и наименьшую пространственно-структурную единицу, в которой проявляются особенности фитоценоза (мини-фитоценоз, парцелла, и др.[8]), хотя это и сопряжено с большими методическими трудностями. Кроме индекса разнообразия Шеннона-Уивера, для стадий сукцессии растительности отвалов угольных шахт Донбасса вычислен и другой наиболее часто применяемый индекс разнообразия – Симпсона, иногда называемый индексом доминирования [4]. Его изменения в ходе развития фитоценозов происходят согласованно с изменениями индекса разнообразия Шеннона-Уивера (табл.), повышаются от стадии к стадии сукцессии растительности, но при несколько более высоких значениях. Так как эти показатели сходно отражают разнообразие, а в системных исследованиях обычно применяется последний показатель, то дальнейшие расчеты организации фитоценозов и устойчивости их развития вели на его основе.

Таблица. Системные показатели развития фитоценозов по стадиям сукцессии растительности на породных отвалах угольных шахт Донбасса

Параметр системы	Показатель					
	стадии сукцессии					
	I	IIa	IIb	IIc	II	III
Число состояний (среднее количество видов), N(S)	5,17	8,4	12,6	15,58	12,19	21,03
Индекс Шеннона, H	0,65	0,85	1,23	1,4	1,16	1,57
Индекс Симпсона, D	1,95	2,22	3,03	3,46	2,90	3,87
Сложность, H <sub>m</sub>	1,64	2,13	2,53	2,75	2,50	3,05
Организация, O	0,99	1,28	1,30	1,35	1,34	1,48
Относительная организация по Фёрстеру, R <sub>F</sub>	0,60	0,60	0,51	0,49	0,54	0,48
Относительная организация, R <sub>Zh1</sub>	1,65	1,66	1,94	2,04	1,87	2,06
Относительная организация R <sub>Zh2</sub>	0,40	0,40	0,49	0,51	0,46	0,52

Такой показатель, как относительная организация, может стать удобным инструментом для сравнения организации различающихся систем. Логика формулы 4 такова: разница неопределенностей (максимальной и текущей) системы, то есть ее организация, отнесенная к максимальной неопределенности (сложности) дает относительную организацию. Но тут идет подмена максимальной организации системы ее сложностью, а сложность, как максимальная неопределенность системы, то есть равновероятность ее состояний, обратна максимальной организации. Расчет индекса Фёрстера, как и предполагалось из анализа его формулы, дает значения, противоположные значениям остальных показателей, в частности, организации систем. Очевидно, что формулу для соответствия реальному положению вещей, то есть для отражения роста организации сообществ в ходе сукцессии, необходимо обратить, и для этого мы можем предложить новый индекс относительной организации:

$$R_{Zh1} = H_m / O = H_m / (H_m - H), \quad (5)$$

где R<sub>Zh1</sub> – новый индекс относительной организации системы, H – индекс разнообразия Шеннона, H<sub>m</sub> – сложность и O – организация системы.

Хотя у этого индекса варьирование значений уже не укладывается в пределы от 0 до 1. Предлагаемый индекс R<sub>Zh1</sub> показывает стабильное повышение значений относительной организации фитоценозов отвалов шахт в ходе их естественной динамики.

Можно также изменить формулу Фёрстера, упростив ее до отношения существующей неопределенности (индекс Шеннона) к максимальной неопределенности системы ( $H_m$ ).

$$R_{Zh2} = H/H_m \quad (6)$$

Получившийся индекс относительной организации системы  $R_{Zh2}$  имеет пределы варьирования от 0 до 1 и показывает аналогичную предыдущему индексу  $R_{Zh1}$  картину соотношения уровней организации между фитоценозами в ходе их сукцессии.

Сравнивая организацию фитоценозов на разных стадиях сукцессии, можно оценить их устойчивость, в частности, такой ее аспект, как сопротивление, показатель способности избегать изменений, противостоять им, особенно наглядно проявляющийся при анализе изменений относительной организации фитоценозов.

По результатам расчета всех названных индексов (см. табл.), происходит постепенное равномерное повышение уровня организации, а соответственно и устойчивости сообществ в процессе сукцессии. При этом надо учитывать, что фитоценозы третьей стадии в основном представлены сообществами начала этой стадии, вследствие редкости сукцессионно более продвинутых. Разница уровня организации между отдаленными стадиями сукцессии (I и III) – 0,49, т.е. выше, чем между парами последовательно проходящих стадий (I и II, II и III) – 0,35 и 0,14. Также меньше, чем между стадиями, и сопротивление переходам внутри стадии, которое можно оценить по повышению уровня организации от начала к середине и к концу второй стадии.

Относительная организация сообществ возрастает не так равномерно: при переходе от первой к началу второй стадии сукцессии величина относительной организации по предложенному нами индексу  $R_{Zh1}$  (по Жукову) для сообществ изменяется всего на 0,01. Также и переход от конца второй стадии к третьей имеет низкий перепад относительной организации сообществ – 0,02. Внутри второй стадии сообщества начала и конца второй стадии имеют переходную структуру и определенное сходство в структурном отношении, когда смена сообществ вызывает (или вызывается) ослабление внутренних связей, что проявляется в колебаниях видового состава и структуры, иногда в кратковременном возрастании представленности некоторых видов более ранних или более поздних этапов развития. В силу этого такие сообщества имеют меньшую устойчивость, несколько более низкое сопротивление переходу на последующие стадии. Относительная организация сообществ на таких переходных этапах развития, видимо, отражает, меньшую степень закономерности развития существенно более стохастических сообществ начала второй стадии по сравнению с ее окончанием. Можно предположить, что если в конце второй стадии сукцессии развитие сообществ и переходный процесс определяются уже межвидовыми взаимоотношениями, то в начале второй стадии большее влияние оказывало влияние абиотических факторов, и высокое относительное сопротивление переходу от начала к середине второй стадии отражает как раз смену основного фактора формирования растительных сообществ с абиотического на биотический. Иногда длительное поддержание «пионерной» структуры сообществ связано подчас с замедленным развитием абиотической компоненты биогеоценоза. Относительное сопротивление переходу с первой стадии на начало второй стадии сукцессии растительных сообществ очень низкое (0,01), что отражает случайный занос видов, полную несформированность пионерных сообществ первой стадии, самопроизвольно переходящих в более устойчивое состояние первичных группировок. Необходимо учитывать также и то, что первая стадия сукцессии биогеоценозов отвалов угольных шахт связана и с формированием водорослево-микробных сообществ, как и всего эдафотопы, а появление растений может показывать уже определенную степень развития этих процессов. То есть, если рассматривать фитоценозы отдельно от всего биогеоценоза, то организация сообществ от пионерной стадии к началу второй стадии изменяется незначительно, и они должны самопроизвольно переходить друг в друга в связи с низкой устойчивостью (безусловно, при наличии заноса новых видов). Но если привлечь к расчету данные по другим компонентам биогеоценоза, особенно эдафотопы, то может оказаться, что на уровне такой

целостной ячейки жизни, как биогеоценоз, совокупная организация изменяется более заметно. Этим, видимо, и объясняется длительное сохранение пионерных сообществ в некоторых случаях. Конечно, для этого необходимо решить методические вопросы оценки разнообразия структуры эдафотопы, подвижности особей в зооценозе, а для микробоценоза, особенно альгоценоза, применимы те же подходы, что и к сосудистым растениям. Также низкое значение предложенных индексов относительной организации сообществ имеется при переходе от конца второй стадии к третьей стадии сукцессии растительности, то есть и тут переход самопроизволен, но уже больше в силу внутренних по отношению к фитоценозам причин, он обусловлен и предопределен внутренней логикой развития биогеоценозов как термодинамических систем. Это является продолжением общей тенденции эволюционных процессов саморазвития, когда возникновение новых свойств в системах, их сложного поведения обусловлено потерей устойчивости системой в предшествующем, более простом состоянии, обычно осуществляющейся под воздействием изменений внешней среды [7]. Аналогичным образом можно оценивать устойчивость не только ценологических, но и других систем, например, организменных, популяционных, биогеоценологических, так как это позволяет применение системного подхода к их изучению.

### Выводы

Таким образом, системные показатели разнообразия, сложности и организации сообществ показывают их возрастание в ходе сукцессии растительности отвалов угольных шахт. Проведена оценка изменения уровня организации и устойчивости фитоценозов в динамике на модели сукцессии растительности отвалов угольных шахт. Сопrotивление фитоценозов изменениям, структурным переходам в процессе сукцессии выше между отдаленными стадиями и зависит от их структуры. Разница значений индексов относительной организации, то есть относительное сопротивление переходу между сообществами первой стадии и начала второй и конца второй и начала третьей минимальны, что показывает самопроизвольность, детерминированность перехода сообществ на очередные стадии сукцессии вследствие достижения ими критического состояния своей структуры. Изменения устойчивости сообществ между разными стадиями и внутри стадий показывают переход от преобладания в начале сукцессии абиотических факторов формирования сообществ к доминированию в дальнейшем внутренних факторов развития фитоценологических систем.

1. Антомонов Ю.Г. Моделирование биологических систем / Ю.Г. Антомонов. – Киев: Наук. думка, 1977. – 260 с.
2. Дорогуцтов С.І. Екосередовище і сучасність. Т.1. Природне середовище у сучасному вимірі / С.І. Дорогуцтов, М.А. Хвесик, Л.М.Горбач [ та ін.] – К. : Кондор, 2006. – 424 с.
3. Жуков С.П. Взаимоотношения растений при колонизации отвалов шахт Донбасса // Проблемы изучения адвентивной и синантропной флоры в регионах СНГ / под ред. В.С. Новикова и А.В. Щербакова. – М.: Изд-во Ботан. сада Московск. гос. ун-та; Тула: Гриф и КО, 2003. – С. 41 – 43.
4. Жуков С.П. Різноманітність деяких фітосистем з різним рівнем цілісності / С.П. Жуков, Н.Н. Морозова // Укр. ботан. журн. – 2005. – № 6. – С. 48–55.
5. Крисаченко В.С. Екологія, культура, політика. Концептуальні засади сучасного розвитку / В.С. Крисаченко, М.І. Хилькою. – К.: Знання України, 2002. – 598 с.
6. Тимофеева С.С. Основы современного естествознания и экологии / С.С. Тимофеева, С.А. Медведева, Е.Ю.Ларионова. – Ростов на Дону: Фенікс, 2004. – 384 с.
7. Фокс Р. Энергия и эволюция жизни на Земле / Р. Фокс – М.: Мир, 1992. – 216 с.
8. Lopes de Gerenyu V.O. Effect of temperature and moisture content on CO<sub>2</sub> evolution rate of cultivated Phaeozem: analyses of long-term field experiment / V.O. Lopes de Gerenyu, I.N. Kurganova, L.N. Rozanova, V.N. Kudeyarov // Plant, Soil and Environment. – 2005. – Vol. 51, № 5. – P. 213–219.

УДК 581.524:581.55

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОСТИ ФИТОЦЕНОЗОВ  
В ХОДЕ ИХ РАЗВИТИЯ НА ОТВАЛАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

С.П. Жуков

Донецкий ботанический сад НАН Украины

Проведено изучение изменения организации фитоценозов в соответствии с их динамикой на модели сукцессии растительности отвалов угольных шахт. Уровень организации фитоценозов оценивали на основе их системных характеристик: разнообразия, сложности, организации сообществ и предложенных индексов относительной организации. Показано возрастание этих системных показателей в ходе сукцессии растительности на отвалах угольных шахт. Изменения устойчивости сообществ между разными стадиями и внутри стадий показывают переход от преобладания в начале сукцессии абиотических факторов формирования сообществ к доминированию внутренних факторов развития биогеоценозов в дальнейшем.

UDC 581.524:581.55

ON METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF PHYTOCENOSES ORGANIZATION  
AND SUSTAINABILITY IN THE COURSE OF THEIR DEVELOPMENT IN COAL MINE DUMPS

S.P. Zhukov

Donetsk Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine

The study of the changes in phytocenoses organization with relation to their dynamics has been underway. This study was conducted on a model of the coal mine dump vegetation succession. The level of phytocenoses organization has been evaluated basing on their system characteristics: diversity, complexity, communities' organization and the indices of relative organization being suggested. The increase in these system indicators in the process of vegetation succession in coal mine dumps is shown. It is evident from the changes in communities' sustainability at different stages and within each stage that at the beginning of succession the abiotic factors predominantly affected community formation, while further on the interior factors of biogeocenoses development came into effect.