

МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРИРОДНЫХ ЯДЕР ЭКОСЕТИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЕЁ МИГРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА

А.А. БЛАКБЕРН, О.Н. КАЛИНИХИН

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», Донецк

THE METHOD OF SPATIAL CLUSTERING OF NATURAL ECONEC NUCLEARS AS INDICATOR OF THEIR MIGRATION POTENTIAL

A.A. BLAKBERN, O.N. KALINIHN

SEE HPE «Donetsk National Technical University», Donetsk

Резюме. В этой статье предлагается оригинальная методика оценки пространственной иерархической структуры локальной экологической сети Бахмутской водосборной территории на основе определения миграционного потенциала между её природными ядрами. Последний получен на основе гравитационной модели сходства составляющих их геотопов (типов земель) путём комплексной оценки в баллах их экосистемных характеристик. В результате получена пространственная иерархическая структура локальной экосети в виде кластеров природных ядер от 1-го до 4-го порядков. Делается вывод о дискретно-континуальном характере любой экологической сети в процессе перехода её построения от локального (дискретного уровня её организации) к региональному её уровню (с континуальным характером её структурной организации).

Ключевые слова: локальная экологическая сеть, природные ядра, миграционный потенциал, биоцентрично-сетевая структура экосети, пространственная кластеризация природных ядер.

Abstract. In this paper we propose an original method of evaluating the spatial hierarchical structure of the local ecological network in Bakhmutskaya catchment area. This method is based on determining migration potential between area's natural nuclei. The potential is determined on the basis of the gravity model of similarity between nuclei's constituent geotopes (land types) through integrated scale assessment of their ecosystem characteristics. The result is a spatial hierarchical structure of local ecological network in the form of clusters of natural nuclei from 1st to 4th order. The conclusion is made as for the discrete-continuous nature of any ecological network in the transition process of its construction from the local (discrete level of its organization) to its regional level (with the continual nature of its structural organization).

Key words: local ecological network, natural nuclei, migration potential, biocentric net structure of the ecological network, spatial clustering of natural nuclei.

В одной из наших публикаций мы провели комплексную оценку природных ядер в общей структуре локальной экологической сети (на примере Артёмовского района Донецкой области) с целью выявления их приоритетности с природоохранных позиций [Блакберн, Калинихин, 2016]. Однако, общий анализ структуры местной экологической сети на основе комплексной балльной оценки её ядер [Блакберн и др., 2010; Блакберн, Калинихин, 2016] не учитывает самой главной характеристики любой экосети, а именно, её способности обеспечивать миграцию видов (организмов) между её природными ядрами. Биоцентрично-сетевая её структура лишь отчасти отражает эту способность, но лишь на уровне наличия пространственного контакта ядер между собой, без учёта расстояния между ними, общности их биотического состава, влияния размеров ядер на эту миграцию. Без учёта всего этого оценка экосетевого потенциала территории является слишком формальной и до некоторой степени условной.

В данной работе предлагается новая оригинальная методика оценки пространственной связи ядер между собой и эффективности миграционной способности всей экосети в целом на основе определения миграционного потенциала её ядер и, как результат, построения иерархической пространственной её схемы в виде кластеров разного уровня составляющих её природных ядер.

В основе данной методики лежит так называемая «гравитационная модель» взаимного влияния двух однотипных структур или систем при наличии определённой физической связи между ними. Взятая из классических законов физики («закон гравитации, или взаимного притяжения тел» Ньютона), данная модель сейчас используется достаточно широко и в других науках, например, в социально-экономической географии, где она применяется для оценки или прогноза миграционной активности или товаропотока между населёнными пунктами и т.п. [Brunsdon et al., 2002] Также эта модель может быть использована и при оценке интенсивности миграционных связей видов организмов между биоцентрами (или любыми другими природными территориями) [Гродзинский, 1993; Гродзинский, 2005]. В последнем случае в качестве «масс» взаимодействующих участков территории принимаются количество видов (видовое богатство) каждого участка, а количество общих видов на них рассматривается через связывающий коэффициент k .

Однако данный метод возможен при условии хорошей изученности биоты исследуемых территорий. Как показывает опыт многих полевых исследований, даже для хорошо изученных территорий (например, многих ООПТ) далеко не всегда имеет место даже приблизительная инвентаризация всех систематических групп организмов.

Тогда миграционные связи могут быть оценены через степень сходства/различия отдельных видов геотопов и относительные значения площадей этих геотопов в пределах исследуемых территорий. Иначе говоря, чем больше относительная доля одинаковых типов местообитаний (геотопов) между двумя участками территории, тем больше интенсивность миграции организмов между ними.

Метод исследования. Метод оценки миграционного потенциала между природными ядрами экологической сети базируется на следующих положениях:

1) для близкорасположенных природных ядер в границах, как правило, одного физико-географического/геоботанического/флористического/зоогеографического района общность видов практически 100%-ая, то есть, их видовой состав почти что однороден на однотипных участках территорий (в одинаковых типах эко(гео)систем);

2) поэтому логично допустить, что степень взаимного влияния между природными ядрами определяется, в первую очередь, степенью сходства составляющих их типов участков территорий (геотопов).

В этом случае, в первом приближении, весом («массой») каждого природного ядра выступает сумма площадей составляющих его типов участков территорий. Тогда k , например, между ядрами C_i и C_j будет определяться степенью «площадного сходства» составляющих их территорий в виде их отношений, где меньшее значение делится на соответствующее ему большее, так как коэффициент k должен быть в диапазоне от «0» до «1».

[например, долевое распределение типов территорий («с» – сенокосы, «п» – пастбища, «л» – леса, «р» – пашни)

$$C_i = 0,2с : 0,3п : 0,5л;$$

$$C_j = 0,1с : 0,4п : 0,2л : 0,3р;$$

$$\text{тогда } k_{ij} = (0,1с / 0,2с + 0,3п / 0,4п + 0,2л / 0,5л + 0р / 0,3р) : 4 = \\ = (0,5с + 0,75п + 0,4л + 0р) : 4 = 1,65 / 4 = 0,41]$$

Аналогично можно вместо относительной доли площади типов территорий использовать их абсолютные площади (в га или км²);

3) однако для большей объективности оценки значимости природных ядер в качестве их веса («массы»), учитывающей их биологическое и экосистемное разнообразие (а не только площади составляющих их типов участков/территорий), предлагается использовать их балльные оценки по всем рассматриваемым характеристикам, то есть

$$C_i = \text{сумма всех набранных баллов ядра } i,$$

$$C_j = \text{сумма всех набранных баллов ядра } j.$$

Конечным же результатом такой кластеризации должна быть общая картина «миграционного потенциала» данной экосети (или её фрагмента), аналогично «потенциалу

электромагнитного поля» или напряжению канала связи, так как основой любой экосети являются именно её коридоры – её скелет.

Таким образом, выстраивается общая картина пространственной иерархической структуры всего водосборного бассейна реки (или его части), где по потенциалу составляющих его ядер и коридоров методом пространственной кластеризации определяются соответствующие ранги (классы) всей экосети (локальные – местные – субрегиональные – региональные – надрегиональные/национальные).

Миграционный потенциал между природными ядрами водосборной территории р. Бахмутка Донецкой области рассчитывался по выше приведённой методике. В качестве «веса» ядер использовалась ранее полученная их комплексная балльная оценка (табл.). Связывающие коэффициенты k_{ij} и r_{ij} определялись через отношение долей (в %) площадей типов геотопов (в нашем случае типов земельных угодий), где меньшие значения делились на большие. В результате формула миграционной связи имела вид:

$$P_{ij} = k_{ij} r_{ij} C_i C_j / (d_{ij})^2,$$

где P_{ij} – миграционный потенциал между ядрами i и j ; C_i и C_j – соответственно их комплексные балльные оценки (куда входят оценки в баллах по видовому и фитоценологическому богатству, включая и их раритетную составляющую, по занимаемым площадям каждого типа геосистем); k_{ij} – коэффициент схождения их типов геосистем, определяемый отношением меньшего значения на большее для каждого типа геосистем, общего для обоих ядер; r_{ij} – коэффициент схождения типов геосистем между ядрами и связывающего их коридора, рассчитывается аналогично k_{ij} , но площадь общих типов геосистем ядер берётся как средняя арифметическая между ними и соотносится с таковой у экоридора; d_{ij} – расстояние (в км) между ядрами i и j по связывающему их фрагменту экоридора (речной сети).

Например: определение миграционного потенциала между ядрами Я₁ и Я₃:

комплексная балльная оценка ядер Я₁ = 488,0 балла, Я₃ = 177,0 балла.; длина связывающего их фрагмента речной сети – 15,36 км;

$$k_{1/3} = (14,7 / 50,6 (л) + 28,3 / 36,6 (п) + 0,2 / 8,2 (я) + 2,6 / 29,0 (кам) + 2,0 / 7,7 (р)) : 5 = 0,28;$$

$$r_{1/3} = ((17,5 / 0,5 (14,7 + 50,6) (л) + 0,5 (28,3 + 36,6) (п) + 0,3 / 0,5 (0,2 + 8,2) (я) + 5,3 / 0,5 (2,6 + 29,0 (кам) + 4,7 / 0,5 (2,0 + 7,7) (р))) : 5 = 0,49 \text{ (буквенные обозначения см. табл.);}$$

$$P_{1/3} = 0,28 * 0,49 * 488,0 * 177,0 / 15,36^2 = 50,23.$$

Матрица миграционных потенциалов между ядрами Бахмутской водосборной территории приведена в таблице.

Из таблицы видно, что миграционный потенциал связей между ядрами имеет огромный разброс своих абсолютных значений и на первый взгляд здесь не прослеживается какой-либо закономерности, кроме того, что близко расположенные друг к другу ядра имеют в среднем более высокие значения миграционного потенциала между собой, чем с более удалёнными. Тем не менее, даже среди рядом расположенных ядер наблюдается существенная разница в их миграционных потенциалах, объясняемая различной степенью схождения составляющих их типов геосистем как между собой, так и соединяющего их экоридора. Кроме того, из матрицы миграционных потенциалов видно, что их высокие значения образуют в ней определённые компактные группы, группируясь по клеткам матрицы, непосредственно связанными между собой в горизонтальном, вертикальном направлении или по диагонали. Выделяясь на общем числовом фоне своими в несколько раз превышающими остальные значениями миграционного потенциала, такие группы ядер и образуют первичные пространственные кластеры (кластеры 1-го порядка) в экосети по миграционному потенциалу между ними (в таблице они выделены жирным шрифтом). Кроме общего факта наличия тесной связи между ядрами, эти кластеры показывают и наиболее значимые ядра по своему миграционному потенциалу в данном кластере, если эти ядра (или ядро) превышают остальные по числу связей между всеми ядрами в кластере. Иначе говоря, в таком кластере можно выделить центральное (или центральное и суб-центральное) ядро.

Таблица

Миграционный потенциал экосети Аргёмовского района (Бахмутский водосбор)

Я1	Я2	Я3	Я4	Я5	Я6	Я7	Я8	Я9	Я10	Я11	Я12	Я13	Я14	Я15	Я16	Я17	Я18	Я19	Я20	Σij	
-	50,3	46,33	64,44	698,13	21,15	25,51	3,47	7,72	0,28	2,31	3,35	4,35	4,89	0,24	2,30	5,08	1,23	1,57	1,48	1,15	898,88
-	46,33	-	64,44	20,35	10,41	11,20	1,79	5,62	0,20	1,79	2,08	5,24	3,93	0,23	1,29	1,75	1,30	1,07	0,91	1,37	181,3
-	55,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	55,44	-	698,13	20,35	1,52	15116,16	1,1	3,21	0,14	1,01	1,61	2,55	2,47	0,24	0,87	4,95	0,56	0,68	0,62	0,68	15912,29
-	8,25	-	21,15	10,41	1,52	3,05	0,54	1,45	0,007	0,47	0,32	0,56	0,56	0,016	0,47	0,75	0,30	0,15	0,19	0,28	50,44
-	31,25	-	25,51	11,20	15116,16	3,05	26,61	37,52	0,44	12,0	14,65	15,46	25,70	0,52	10,73	10,15	8,19	3,72	2,92	4,04	15359,82
-	4,60	-	3,47	1,79	1,10	0,54	26,61	66,30	0,18	1,25	0,86	1,96	1,28	0,14	1,02	0,94	0,22	0,61	0,68	0,34	113,89
-	16,38	-	7,72	5,62	3,21	1,45	37,52	66,30	0,19	4,44	3,04	7,20	7,30	0,14	2,85	2,15	1,80	0,64	1,39	1,68	171,02
-	0,91	-	0,28	0,20	0,14	0,007	0,44	0,18	0,19	171,39	8,05	309,46	0,34	2,64	0,084	7,12	0,16	0,00	0,32	0,22	502,13
-	4,58	-	2,31	1,79	1,01	0,47	12,00	1,25	4,44	171,39	198,81	302,89	4,53	3,07	3,02	23,24	1,23	2,08	2,12	1,21	741,44
-	4,29	-	3,35	2,08	1,61	0,32	14,65	0,86	3,04	8,05	198,81	2222,05	4,88	3,64	3,40	24,37	5,00	1,97	7,07	2,66	2512,10
-	10,26	-	4,35	5,24	2,55	0,56	15,46	1,96	7,20	309,46	302,89	2222,05	9,48	33,08	3,56	81,09	11,86	7,45	6,78	5,26	3040,54
-	8,41	-	4,89	3,93	2,47	0,56	25,70	1,28	7,30	0,34	4,53	4,88	9,48	0,35	12,85	4,07	4,37	3,06	1,77	2,36	102,6
-	0,98	-	0,24	0,23	0,24	0,016	0,52	0,14	0,14	2,64	3,07	3,64	33,08	0,35	0,08	634,54	0,15	0,20	0,13	0,15	680,54
-	3,45	-	2,30	1,29	0,87	0,47	10,73	1,02	2,85	0,084	3,02	3,40	3,56	12,85	0,08	4,85	0,86	1,27	1,48	1,09	55,52
-	10,41	-	5,08	1,75	4,95	0,75	10,15	0,94	2,15	7,12	23,24	24,37	81,09	4,07	634,54	4,85	31,29	10,24	5,81	15,66	878,46
-	2,92	-	1,23	1,30	0,56	0,30	8,19	0,22	1,80	0,16	1,23	5,00	11,86	4,37	0,15	0,86	0,20	0,27	0,24	1846,85	3280,44
-	4,32	-	1,57	1,07	0,68	0,15	3,72	0,61	0,64	0,00	2,08	1,97	7,45	3,06	0,20	1,27	10,24	1846,85	94,48	39,17	2019,53
-	3,49	-	1,48	0,91	0,62	0,19	2,92	0,68	1,39	0,32	2,12	7,07	6,78	1,77	0,13	1,48	5,81	1255,75	94,48	99,87	1487,26
-	3,49	-	1,15	1,37	0,68	0,28	4,04	0,34	1,68	0,22	1,21	2,66	5,26	2,36	0,15	1,09	15,66	106,40	39,17	99,87	287,08
Сум.	14,21	-	47,31	9,54	837,5	2,65	808,41	6,00	9,00	26,43	39,02	132,20	160,03	5,40	35,82	2,92	46,23	172,65	106,30	78,28	15,11

Кроме того, из матрицы (табл.) видно, что некоторые ядра, имеющие существенные значения своего миграционного потенциала, могут одновременно находиться в разных кластерах. Такие ядра являются связывающими эти кластеры между собой, образуя, таким образом, кластеры 2-го порядка. Группируя кластеры 1-го порядка через связывающие их ядра в кластеры 2-го порядка, можно увидеть дальше, что есть ядра, которые связывают между собой и кластеры 2-го порядка, то есть образуют кластеры 3-го порядка (либо целые кластеры нижнего порядка одновременно могут входить в два разных кластера более высокого порядка), и, соответственно, общие ядра (или группы ядер) между кластерами 3-го порядка (т.е. связывающие их между собой) образуют кластеры природных ядер 4-го порядка. Иначе говоря, имеет место вид пятнистой иерархической конфигурации структуры ландшафта, когда две или несколько геотопических конфигураций, полностью или частично перекрываясь между собой, образуют геотопическую структуру более высокого ранга, как правило, более сложно организованную [Гродзинский, 2005].

В результате в общей пространственной структуре экосети Бахмутского водосбора все составляющие его природные ядра группируются в четырёхуровневую иерархическую структуру кластеров, в которой можно выделить по степени связывающей их функции центральные и субцентральные ядра. Это, прежде всего, ядра Я₇, Я₁₇ и Я₁₃, имеющие во всей сети наибольшее количество связей с высоким миграционным потенциалом, среди которых центральным является Я₇ (количество значимых миграционных связей равно 12), и субцентральными ядра Я₁₇ и Я₁₃ (количество значимых миграционных связей равно соответственно 8 и 7).

В схеме пространственной кластеризации природных ядер эти ядра также играют центральную роль, встречаясь чаще всего в областях «перекрытия» кластеров. Обращаясь к картосхеме пространственной структуры экосети Бахмутского водосбора, можно сказать о двух «полях сгущения» её миграционного потенциала: это так называемое малое центральное поле повышенной концентрации миграционных связей – в треугольнике ядер (Я₁₁ + Я₁₂ + Я₁₃), куда из-за территориальной близости можно включить и ядро Я₁₀, и большое центральное поле повышенной концентрации миграционных связей – в треугольнике, углами которого являются ядра Я₇, Я₁₇ и Я₁₈ (+ Я₁₈, Я₁₈). Причём первое малое поле находится внутри пространства большего.

Сравнивая полученные данные по миграционному потенциалу природных ядер экосети Бахмутского водосбора с данными этих ядер по их оценкам в баллах по выше перечисленным характеристикам, можно с уверенностью констатировать об особом значении в экосети водосбора ядер Я₇ и Я₁₇. Получив наивысшие оценки практически по всем своим характеристикам, и, как следствие, по совокупной балльной оценке [Блакберн, Калинин, 2016], они также занимают ведущее положение и в потенциальных миграционных связях водосбора. Это заставляет обратить на них особое внимание при проектировании экологической сети в данном районе. Было бы очень желательно после более детального их обследования, внести наиболее ценные участки их территории в ПЗФ региона. Возможно и внесение в ПЗФ целого кластера между «треугольником» ядер (Я₁₁ + Я₁₂ + Я₁₃) и ядром Я₁₇ в качестве регионального ландшафтного парка (РЛП) с функциональным зонированием его территории.

Таким образом, метод пространственной кластеризации природных ядер на основе их миграционного потенциала показывает неизбежность перехода от дискретного принципа построения экологической сети на локальном (топическом) уровне её исследования, когда можно выделить и оценить элементарные структурные её единицы – природные ядра (биоцентры), к континуальному подходу на хорическом и региональном уровнях, при которых на первое место выступает определённая функциональная её характеристика (в данном случае её миграционный потенциал). А сам метод пространственной кластеризации позволяет выявить дискретно-континуальную сущность любой экологической сети в процессе изменения масштаба её построения.

ЛИТЕРАТУРА

- Блакберн А.А., Калинин О.Н. 2016. Оценка пространственной структуры локальной экологической сети. *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. 2(22): 206–219.
- Блакберн А.А., Дербенцева А.В., Муленкова Е.Г., Остапко В.М., Эндеберя А.Я. 2010. Формирование районных экологических сетей на примере Славянского и Краснолиманского районов Донецкой области. *Заповідна справа в Україні*. Т. 16. Вип. 2: 1–8.
- Гродзинський М.Д. 1993. Основи ландшафтної екології. Київ: «Либідь»: 224 с.
- Гродзинський М.Д. 2005. Пізнання ландшафту: місце і простір Т.1. Київ: Вид. центр «Київський університет»: 431 с.
- Brunsdon C, Fotheringham AS, Charlton M. 2002. Geographically weighted summary statistics – a framework for localised exploratory data analysis. *Comput Environ Urban Syst*. 26: 501–524.

АДАПТАЦИЯ МИКРОКЛОНОВ ВЕЙГЕЛЫ ЦВЕТУЩЕЙ
«ВАРИЕГАТА» К УСЛОВИЯМ СОЛЕВОГО И МЕДНОГО СТРЕССОВ

О.А. ЗЕМЛЯНУХИНА, В.Н. КАЛАЕВ, В.С. ВОРОНИНА

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», Воронеж (oz54@mail.ru)

ADAPTATION OF *WEIGELA FLORIDA* «VARIEGATA» MICROCLONES
TO SALT- AND COOPER INDUCED STRESS

O.A. ZEMLIANUKHINA, V.N. KALAEV, V.S. VORONINA

FSBEI HPE «Voronezh State University», Voronezh (oz54@mail.ru)

Резюме. В результате длительной трёхступенчатой адаптации получены пробирочные растения вейгелы, устойчивые к детальным концентрациям меди и морской соли. Впервые показано, что по мере адаптации количество свободного пролина снижается ниже контрольного уровня, приближаясь к таковому у растений в условиях *in vivo*. Маркерами адаптации являются изоцитратлиаза и глюкозо-6-фосфатдегидрогеназа.

Ключевые слова: вейгела, микроклоны, адаптация, пролин, устойчивость

Abstract. As a result of long time three step adaptation process microclones resistant to lethal copper (CuCl_2) and sea salt concentrations of *Weigela florida* «Variegata» were obtained. It has been shown for the first time that free proline content was decreased below control plants becoming similar *in vivo* ones. Isocitrate lyase and glucose-6-phosphate dehydrogenase are the adaptation markers.

Key words: weigela, microclones, adaptation, proline, resistance

В настоящее время процесс деградации почвы значительно усилился в результате как естественных причин, так и за счёт хозяйственной деятельности человека. При этом происходит как засоление земель, так и их загрязнение тяжёлыми металлами. К последним относятся медь, свинец, алюминий и другие металлы. Подобные загрязнения наблюдаются как вблизи магистральных трасс, так и рядом с функционирующими фабриками и заводами. Нарушение баланса экосистем возникает и за счёт добычи полезных ископаемых, что характерно для многих регионов России и других стран. При этом возникают биологически стерильные отвалы, которые подлежат восстановлению за счет рекультивации почв биологическими способами, в число которых входит заселение растениями, способными расти и нормально развиваться в неблагоприятных условиях. В силу наличия больших площадей, требующих рекультивации, возникает необходимость получения