

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК [581.526.323.3:57.087.1](265.54)

Б.И. Семкин, Л.И. Варченко*

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО
ГАМИЛЬТОНОВА ЦИКЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЗОННЫХ
ИЗМЕНЕНИЙ МАКРОФИТОБЕНТОСА
(НА ПРИМЕРЕ ЗАЛИВА ВОСТОК ЯПОНСКОГО МОРЯ)

Предложен метод построения оптимального гамильтонова цикла для исследования циклических изменений видового состава макрофитобентоса. Составлены видовые списки для каждого месяца сбора водорослей-макрофитов и высших растений. Установлены необходимые требования к сравниваемым видовым спискам. Показано, что оптимальные гамильтоновы циклы (оптимальные циклы) для списков без константных видов отличаются от оптимальных гамильтоновых циклов для полных списков тем, что у них происходит увеличение мер различия, особенно в зимний период сезона. Для оценки различия между видовыми списками предпочтительно использовать меры различия Серенсена, Жаккара и им эквивалентные.

Ключевые слова: оптимальный гамильтонов цикл, оптимальный путь, меры различия Серенсена и Жаккара, макрофитобентос, видовые списки.

DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-233-238.

Semkin B.I., Varchenko L.I. Using the method of building of optimal Hamiltonian cycle for investigation of seasonal changes in macrophytobentos (on example of the Vostok Bay, Japan Sea) // *Izv. TINRO*. — 2019. — Vol. 197. — P. 233–238.

Method of building of optimal Hamiltonian cycle is proposed for study of cyclic changes in species composition of macrophytobenthos in the Vostok Bay. Compiled lists of macroalgae and higher plants are composed for each month. Requirements for the species lists comparing are established. The optimal Hamiltonian cycles for the lists without permanent species are different from those for the complete lists because of higher values of the measures of difference, particularly in winter. The Sørensen–Dice coefficient, Jaccard similarity index, or equivalent measures are recommended to use for assessment of the differences between the species lists.

Key words: optimal Hamiltonian cycle, optimal Hamiltonian path, Sørensen–Dice coefficient, Jaccard similarity index, macrophytobenthos, list of species.

Введение

Впервые один из авторов настоящей статьи [Семкин, 1978] указал на возможность использования метода построения оптимального гамильтонова цикла [Берж, 1962] для упорядочивания булевых дескриптивных множеств (видовых списков). Однако только

* Семкин Борис Иванович, доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: semkin@tigdvo.ru; Варченко Лариса Ивановна, научный сотрудник, e-mail: varchenkol@tigdvo.ru.

Semkin Boris I., D.Biol., professor, leading researcher, e-mail: semkin@tigdvo.ru; Varchenko Larisa I., researcher, e-mail: varchenkol@tigdvo.ru.

в 2011 г. М.В. Горшкову [2011] удалось впервые реализовать этот метод для построения оптимального гамильтонова цикла в простом случае, когда описания (видовые списки) определялись в строгой последовательности временных промежутков (месяцев), т.е. списки составлялись для каждого месяца года. Особо следует отметить, что гамильтонов цикл определялся для уникальных данных И.С. Гусаровой [1988] по круглогодичной изменчивости водорослей-макрофитов зал. Восток. В этом случае «природа сама решила» сложную задачу построения оптимального гамильтонова цикла.

Цель настоящей работы — на данных И.С. Гусаровой [1988] проверить меры различия между списками видов рядом расположенных месяцев и нанести их значения на круг.

Материалы и методы

Альгофлора зал. Восток хорошо изучена в систематическом плане [Макиенко, 1975; Гусарова, 1988; Коженкова, 2008]. Составлен аннотированный список водорослей и высших растений [Гусарова, 1988], включающий 115 видов, из них 13 Chlorophyta (зеленые), 33 Phaeophyta (бурые) и 65 Rhodophyta (красные). В этом списке приведены данные по периодам вегетации видов водорослей-макрофитов, что позволило составить из них списки видов для каждого месяца.

Эти списки пронумерованы и упорядочены от 1 до 12. Например, 1 — виды, собранные в период от 1 января до 1 февраля; 12 — виды, собранные от 1 декабря предыдущего года до 1 января следующего года. В нашем случае указание сроков сбора в течение месяца строго не определено, хотя желательно точно указывать дату сбора растений и стадию (фазу развития). Списки были разбиты на два типа: полный список и список, исключая константные виды (виды, вегетирующие круглый год). Для полных списков и для списков без константных видов рассчитаны матрицы пересечения (табл. 1, 2).

Таблица 1

Матрица пересечения для полных видовых списков макрофитобентоса зал. Восток Японского моря по данным И.С. Гусаровой [1988]

Table 1

Matrix of crossings for full lists of macrophytobenthos species in the Vostok Bay of the Japan Sea [from: Гусарова, 1988]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	55	55	54	54	54	55	53	49	46	50	51	53
2	55	74	73	73	73	74	72	64	59	62	60	54
3	54	73	86	86	85	85	83	73	66	68	64	53
4	54	73	86	92	91	91	89	78	70	72	69	55
5	54	73	85	91	100	100	98	87	76	76	71	57
6	55	74	85	91	100	112	110	98	85	85	79	60
7	53	72	83	89	98	110	112	100	87	86	79	58
8	49	64	73	78	87	98	100	100	86	83	75	54
9	46	59	66	70	76	85	87	86	88	83	73	50
10	50	62	68	72	76	85	86	83	83	88	78	55
11	51	60	64	69	71	79	79	75	73	78	81	58
12	53	54	53	55	57	60	58	54	50	55	58	60

Матрица пересечения является «основным документом» для расчетов мер сходства и различия (после списков видов), так как матрица пересечения содержит информацию о числе видов в каждом списке (по диагонали) и о числе видов, общих для каждой пары сравниваемых списков (на пересечении соответствующих столбцов и строк).

Для построения оптимального пути и оптимального гамильтонова цикла используются меры различия Серенсена и Жаккара [Семкин и др., 2010а; Semkin, 2012]:

$$F_0(A, B) = \frac{a + b - 2c}{a + b} \text{ и } F_1(A, B) = \frac{a + b - 2c}{a + b - c},$$

где A и B — списки видов; a — число видов в списке A ; b — число видов в списке B . Эти меры различия эквивалентны, причем мера различия Жаккара является расстоя-

Таблица 2

Матрица пересечения для списков макрофитобентоса зал. Восток Японского моря по данным И.С. Гусаровой [1988], без константных видов

Table 2

Matrix of crossings for the lists of macrophytobenthos species without permanent species in the Vostok Bay of the Japan Sea [from: Гусарова, 1988]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	11	11	10	10	10	11	9	5	2	6	7	9
2	11	30	29	29	29	30	28	20	15	18	16	10
3	10	29	42	42	41	41	39	29	22	24	20	9
4	10	29	42	48	47	47	45	34	26	28	25	11
5	10	29	41	47	56	56	54	43	32	32	27	13
6	11	30	41	47	56	68	66	54	41	41	35	16
7	9	28	39	45	54	66	68	56	43	42	35	14
8	5	20	29	34	43	54	56	56	42	39	31	10
9	2	15	22	26	32	41	43	42	44	39	29	6
10	6	18	24	28	32	41	42	39	39	44	34	11
11	7	16	20	25	27	35	35	31	29	34	37	14
12	9	10	9	11	13	16	14	10	6	11	14	16

нием (метрикой) [Levandowsky, Winter, 1971], а мера различия Серенсена не является расстоянием.

Меры различия F_0 и F_1 связаны простой зависимостью: $F_1 = \frac{2F_0}{1 + F_0}$.

В нашем простейшем случае для построения оптимального гамильтонова цикла использовали только метод оптимального пути [Горшков, 2011]. За меру разновеликости описаний по числу видов принималась мера концентрации [Акофф, Эмери, 1974;

Семкин и др., 2010б]: $Q(p) = 1 - R(p)$, $0 \leq Q(p) \leq 1 - (1/n)$; $R(p) = \sum_{t=1}^n \min(p_t, 1/n)$.

При $n = 2$ мера концентрации равна $\min(P_1, 1/2) + \min(P_2, 1/2)$.

Пример. Определим меру разновеликости для первого и второго описаний (табл. 1): $Q(p) = 1 - [\min(0,43; 0,5) + \min(0,57; 0,5)] = 1 - (0,43 + 0,5) = 1 - 0,93 = 0,07$; $R(p) = 1 - Q(p) = 1 - 0,07 = 0,93$.

Результаты и их обсуждение

По матрице пересечения для полных списков рассчитаны меры различия Серенсена (табл. 3, над диагональю) и Жаккара (табл. 3, под диагональю).

Таблица 3

Матрица мер различия Серенсена (над диагональю) и Жаккара (под диагональю) для полных списков видов

Table 3

Matrix of Sørensen–Dice coefficient (above the diagonal) and Jaccard similarity index (under the diagonal) for full lists of macrophytobenthos species

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	X	14,7	23,4	26,5	30,3	34,1	36,5	36,8	35,7	30,1	25,0	7,8
2	25,7	X	8,7	12,0	16,1	20,4	22,6	26,4	27,2	23,5	22,6	19,4
3	37,9	16,1	X	3,4	8,6	14,1	16,2	21,5	24,1	21,7	23,4	27,4
4	41,9	21,4	6,5	X	5,7	10,8	12,7	18,7	22,2	20,0	20,2	27,6
5	46,5	27,7	15,8	10,7	X	5,7	7,5	13,0	19,1	19,1	21,5	28,7
6	50,9	33,9	24,7	19,5	9,9	X	1,8	7,5	15,0	15,0	18,1	30,2
7	53,5	36,9	27,9	22,5	14,0	3,5	X	5,7	13,0	14,0	18,1	32,6
8	53,8	83,5	35,4	31,5	23,0	14,0	10,7	X	8,5	11,7	17,1	32,5
9	52,6	42,8	38,8	36,3	32,1	26,1	20,0	15,7	X	5,7	13,6	32,4
10	46,2	38,1	35,7	33,3	32,1	26,1	24,6	20,9	10,8	X	7,7	25,7
11	40,0	36,9	37,9	33,6	35,4	30,7	30,7	29,2	23,9	14,3	X	17,7
12	14,5	32,5	43,0	43,3	44,6	46,4	49,2	49,1	48,9	40,9	30,1	X

По матрице пересечения для списков видов, исключая постоянные виды, также рассчитаны меры различия Серенсена (табл. 4, над диагональю) и Жаккара (табл. 4, под диагональю).

Таблица 4

Матрица мер различия Серенсена (над диагональю) и Жаккара (под диагональю) для списков без постоянных видов

Table 4

Matrix of Sørensen–Dice coefficient (above the diagonal) and Jaccard similarity index (under the diagonal) for the lists of macrophytobenthos species without permanent species

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	X	46,3	62,3	66,1	70,1	72,2	77,2	85,1	92,7	78,2	70,8	33,3
2	63,3	X	19,4	25,6	32,6	38,8	42,9	53,5	59,5	51,4	52,2	56,5
3	76,8	32,6	X	6,7	16,3	25,5	29,1	40,8	48,8	44,2	49,4	69,0
4	79,6	40,8	12,5	X	9,6	19,0	22,4	34,6	43,5	39,1	41,2	65,6
5	82,4	49,2	28,0	17,5	X	9,7	12,9	23,2	36,0	36,0	41,9	63,9
6	83,9	55,9	40,6	31,9	17,7	X	2,9	12,9	26,8	26,8	33,3	61,9
7	87,1	60,0	45,1	36,6	22,9	5,7	X	9,7	23,2	25,0	33,3	66,7
8	92,0	69,7	58,0	51,4	37,7	22,9	17,6	X	16,0	22,0	33,3	72,2
9	96,2	74,6	65,6	60,6	52,9	42,3	37,7	27,6	X	11,4	28,4	80,0
10	87,8	67,9	61,3	56,2	52,9	42,3	40,0	36,1	20,4	X	16,0	63,3
11	82,9	68,6	66,1	58,4	59,1	50,0	50,0	50,0	44,2	27,7	X	47,2
12	50,0	72,2	81,7	79,2	78,0	76,5	80,0	83,9	88,9	77,5	64,1	X

По данным табл. 3 построены оптимальные гамильтоновы циклы для полного списка видов (рис. 1) и по данным табл. 4 — для списков видов, исключая постоянные виды (рис. 2).

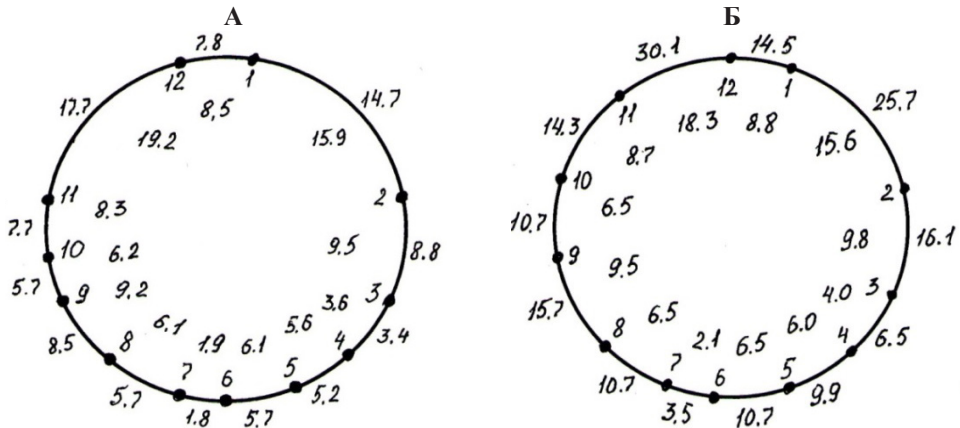


Рис. 1. Оптимальный гамильтонов цикл, построенный по полному списку видов макрофитобентоса: А — с использованием мер различия Серенсена; Б — Жаккара

Fig. 1. The optimal Hamiltonian cycle for complete list of macrophytobenthos species: А — based on Sørensen–Dice coefficient; Б — based on Jaccard similarity index

Из данных рис. 1 и 2 следует, что эквивалентные меры различия Серенсена и Жаккара в случае полных видовых списков и списков с удаленными постоянными видами дают приблизительно одинаковые результаты в распределении долей на оптимальном цикле (на внутренней части оптимального гамильтонова круга приведены меры различия). Меры различия зимних месяцев резко различаются для списков с удаленными постоянными видами (см. значения мер различия на внешней части оптимального гамильтонова круга; рис. 2).

Заключение

Оптимальный гамильтонов цикл в случае попарного сравнения видовых списков, собранных для каждого месяца, строится методом оптимального гамильто-

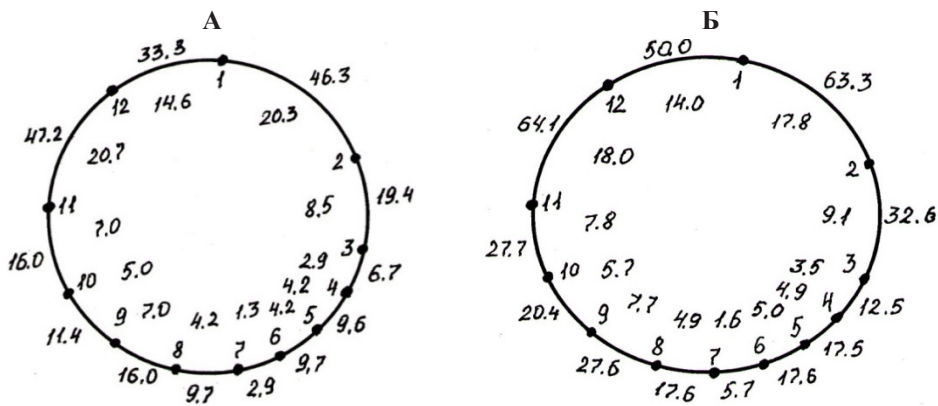


Рис. 2. Оптимальный гамильтонов цикл, построенный по списку видов, исключая константные виды: А — с использованием мер различия Серенсена; Б — Жаккара

Fig. 2. The optimal Hamiltonian cycle for the list of species without permanent species: А — based on Sørensen–Dice coefficient; Б — based on Jaccard similarity index

нова пути и соединением видовых списков декабря и января последующего года. Следует особо отметить, что при этом сравниваются только видовые списки, для которых мера разновеликости должна быть достаточно низкой (в нашем случае: $Q \leq 0,07$; $R \geq 0,93$).

Предложенный метод построения оптимального гамильтонова цикла при условии сравнения одноразмерных описаний по числу видов вполне может использоваться в исследованиях внутриводного динамике видового состава.

Благодарности

Авторы благодарны проф. В.П. Шунтову за ценные замечания, которые были учтены при подготовке настоящей рукописи к печати, а также сотруднику ТИГ ДВО РАН М.В. Горшкову за полезные обсуждения вопросов об алгоритмах построения оптимального гамильтонова цикла и его графического изображения.

Финансирование работы

Работа выполнена по госбюджетной теме: «Естественные и антропогенные факторы в эволюции, динамике и устойчивости разноранговых геосистем и их компонентов в переходной зоне суша–океан» (№ АААА-А16-116110810014-2).

Соблюдение этических стандартов

В статье используются только опубликованные ранее материалы.

Информация о вкладе авторов

Б.И. Семкиным предложен метод построения оптимального гамильтонова цикла для упорядочивания дескриптивных множеств, который в последующем был применен для исследования сезонной динамики водорослей-макрофитов в зал. Восток (Японское море); Л.И. Варченко сделана математическая статистическая обработка материала и его интерпретация, графическое обеспечение, оформление и редактирование статьи. Совместно обсуждены результаты обработки материала.

Список литературы

- Акофф Р.Л., Эмери Ф.Е. О целеустремленных системах : моногр. : пер. с англ. — М. : Советское радио, 1974. — 272 с.
 Берж К. Теория графов и ее применения : моногр. : пер. с фр. — М. : Изд-во иностр. лит., 1962. — 320 с.

Горшков М.В. Об использовании теоретико-графовых методов для исследования внутри-годовой динамики сообществ водорослей-макрофитов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2011. — № 6(29). — С. 18–25.

Гусарова И.С. Макрофитобентос залива Восток (Японское море) // Комаровские чтения. — 1988. — Вып. 35. — С. 11–35.

Коженкова С.И. Ретроспективный анализ морской флоры залива Восток Японского моря // Биол. моря. — 2008. — Т. 34, № 3. — С. 159–174.

Макненко В.Ф. Водоросли-макрофиты залива Восток (Японское море) // Биол. моря. — 1975. — № 2. — С. 45–57.

Семкин Б.И. Принципы автоматической систематизации биоценологических описаний // 3-я Всесоюз. конф. по биологической и медицинской кибернетике : тез. докл. — М. ; Сухуми : Науч. совет по комплекс. проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1978. — Т. 3. — С. 325–328.

Семкин Б.И., Орешко А.Н., Горшков М.В. Об использовании биоинформационных технологий в сравнительной флористике. III. Относительные меры сходства и различия дескриптивных множеств // Бюл. БСИ ДВО РАН [электронный ресурс] : науч. журн. / Ботан. сад-институт ДВО РАН. — Владивосток, 2010а. — Вып. 6. — С. 76–89.

Семкин Б.И., Ключкова Н.Г., Гусарова И.С., Горшков М.В. Дискретность и континуальность флор водорослей-макрофитов дальневосточных морей России. III. Таксономические спектры // Изв. ТИНРО. — 2010б. — Т. 163. — С. 217–227.

Levandowsky M., Winter D. Distance between sets // *Nature*. — 1971. — Vol. 234, № 5323. — P. 34–35.

Semkin B.I. Elementary theory of similarities and its use in biology and geography // *Pattern Recognition and Image Analysis*. — 2012. — Vol. 22. — P. 92–98. DOI: 10.1134/S1054661812010300.

References

Ackoff, R.L. and Emery, F.E., *On Purposeful Systems*, Chicago: Aldine-Atherton, 1972.

Berge, C., *Théorie des Graphes et ses Applications*, Paris: Dunod, 1958.

Gorshkov, M.V., On the use of theoretical graph methods for the study of intra-annual dynamics of macrophytic algae communities, *Aktual. Probl. Gumanitarn. Estestv. Nauk*, 2011, no. 6(29), pp. 18–25.

Gusarova, I.S., Macrophytobenthos of Vostok Bay (Sea of Japan), *Komarovskiye Chteniya*, 1988, vol. 35, pp. 11–35.

Kozhenkova, S.I., Retrospective analysis of the marine flora of Vostok Bay, Sea of Japan, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 263–278.

Makienko, V.F., Algal macrophytes of Vostok Bay (Sea of Japan), *Sov. J. Mar. Biol.*, 1975, vol. 1, no. 2, pp. 117–128.

Semkin, B.I., Principles of automatic systematization of biocenotic descriptions, in *Tretya Vses. konf. po biologicheskoi i meditsinskoi kibernetike, tezisy dokl.* (Proc. 3rd All-Soviet Conference on Biological and Medical Cybernetics), Sukhumi: Nauchn. Sov. Kompleksn. Probl. “Kibernetika” Akad. Nauk SSSR, 1978, vol. 3, pp. 325–328.

Semkin, B.I., Oreshko, A.N., and Gorshkov, M.V., About the use of bioinformation technologies in comparative floristic studies. III. Relative measures of similarity and dissimilarity of descriptive sets, *Byull. Bot. Sada-Inst. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2010a, vol. 6, pp. 76–89.

Semkin, B.I., Klochkova, N.G., Gusarova, I.S., and Gorshkov, M.V., Discreteness and continuity of macrophyte algae floras in the Far Eastern Seas. III. Taxonomic spectra, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2010b, vol. 163, pp. 217–227.

Levandowsky, M. and Winter, D., Distance between sets, *Nature*, 1971, vol. 234, no. 5323, pp. 34–35.

Semkin, B.I., Elementary theory of similarities and its use in biology and geography, *Pattern Recognit. Image Anal.*, 2012, vol. 22, pp. 92–98. doi 10.1134/S1054661812010300

Поступила в редакцию 3.04.2019 г.

После доработки 6.05.2019 г.

Принята к публикации 15.05.2019 г.