

TPSCreator – макрос Microsoft® Office Excel для конверсии фенограмм в формат tps-файла 2018. (руководство пользователя)

2018 © Т. С. Ослина, А. Г. Васильев, И. А. Васильева,
Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург,
лаборатория эволюционной экологии
e-mail: vag.ipae.uran.ru

А.Г. Васильевым и И.А. Васильевой разработан новый метод фенетики – геометрическая фенограмметрия – интегрирующий возможности фенетики и геометрической морфометрии (Васильев, Васильева, Шкурихин, 2018). Данный метод позволяет сравнивать индивидуальные и групповые композиции дискретных морфоструктур (фенов), а также выборки по частотам встречаемости качественных признаков с помощью методов геометрической морфометрии (Rohlf, Slice, 1990; Zelfitch et al., 2004; Klingenberg, 2011). Такой подход раскрывает новые возможности для фенетики популяций (Berry, Searle, 1963; Тимофеев-Ресовский, Яблоков, 1973; Тимофеев-Ресовский и др., 1973; Яблоков, 1980; Яблоков, Ларина, 1985; Васильев, 1988, 2005, 2009; Васильев, Васильева, 2009).

Фенограмметрия

Визуализация композиций фенов основана на хорошо известном в популяционной генетике методе полигонов А. С. Серебровского (1970), предложенном им для сравнений популяций кур по частотам встречаемости аллелей разных генов, имеющих дискретное фенотипическое проявление. Каждому исследуемому признаку соответствует вектор определенного направления с длиной, равной частоте встречаемости данного признака. Векторы проводятся из центра круга, радиус которого равен 100 (соответствует 100% встречаемости признака), углы между смежными векторами равны. При соединении концов векторов признаков линией формируется контур полигона, который имеет сходную конфигурацию у групп/популяций с близкими частотами встречаемости признаков, но различную при несходстве частот. Так А. С. Серебровскому удалось выявить (Серебровский, 1970) разную степень сходства генетической структуры популяций кур из населенных пунктов в горах Кавказа при разной степени их орографической изоляции (рис. 1).

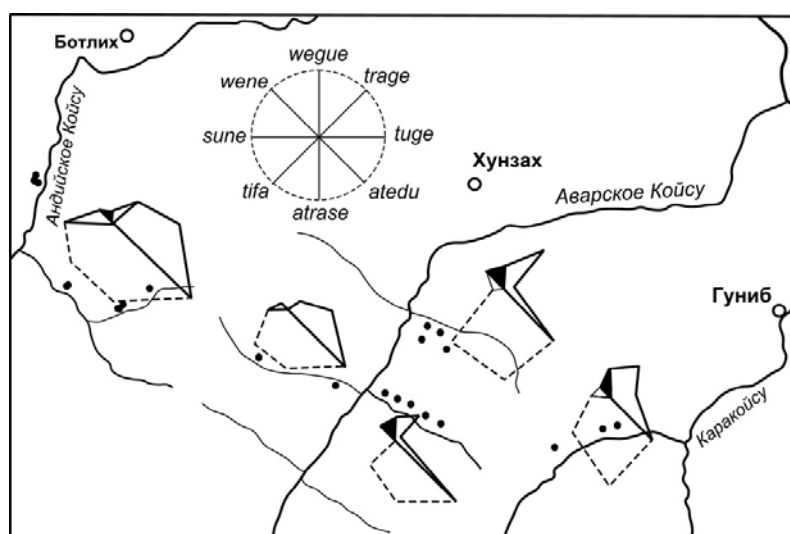


Рис. 1. Полигоны А. С. Серебровского, визуализирующие географические различия генетической структуры популяций кур из разных населенных пунктов Кавказа с разной степенью их орографической изоляции по частотам встречаемости 8 мутантных аллелей (*atedu*, *atrase*, *sune*, *tifa*, *trage*, *tuge*, *wegue*, *wene*) (по Серебровский, 1970, стр.191, рис. 61 с изменениями)

Fig. 1. Serebrovski's polygons visualizing geographic variation of genetic structure in hen's populations based on frequencies of 8 mutant alleles (atedu, atrase, sune, tifa, trage, tuge, wegue, wene) from different human settlements on Caucasus with different degree of their orographic isolation (by Serebrovski, 1970, p. 191, Fig. 61 with modifications)

Полигоны А. С. Серебровского как геометрические фигуры характеризуются некоторой формой: у них может быть изрезанный или напротив относительно гладкий контур, сам полигон может быть округлым или вытянутым в длину/ширину и т.д. Если исследуемые выборки сходны по анализируемым признакам, то и полигоны будут сходны по форме. У полигона А. С. Серебровского легко "гомологизируются" вершины, так как для каждого признака задано определенное направление вектора. Поэтому такие полигоны пригодны для расстановки ландмарков, что дает возможность их дальнейшего сравнения методами геометрической морфометрии.

Следуя принципу построения полигона А. С. Серебровского можно визуализировать матрицы данных, характеризующие проявление гомологичных фенотипических признаков. А. Г. Васильев и И. А. Васильева (Васильев, Васильева, 2017) предложили называть такие индивидуальные и групповые полигоны фенограммами или астеронами. Фенограммы могут быть представлены и в виде гистограмм, где признакам соответствуют вертикальные линии. Такая фенограмма в некоторой степени соответствует структуре сонограмм, которые используются при анализе акустических сигналов млекопитающих методами геометрической морфометрии (MacLeod et al., 2013). Мы выбрали для дальнейшего использования астерон, поскольку он компактнее.

На рис. 2 показаны примеры фенограмм, построенных по результатам изучения фенотипических признаков черепа обыкновенной полевки (*Microtus arvalis*). Первая фенограмма (рис. 2а) построена по матрице бинарных данных, характеризующих индивидуальное проявление гомологичных фенотипических признаков, где цифра 1 означает, что фенотипический признак не проявился, а цифра 2, что фенотипический признак проявился. Представляется очевидным, что такой способ кодирования удобнее для визуализации, чем 0 и 1. Если фенотипический признак не проявился, конец соответствующего ему вектора окажется на внутренней окружности, радиус которой равен 1, а если фенотипический признак проявился – на внешней, радиус которой равен 2.

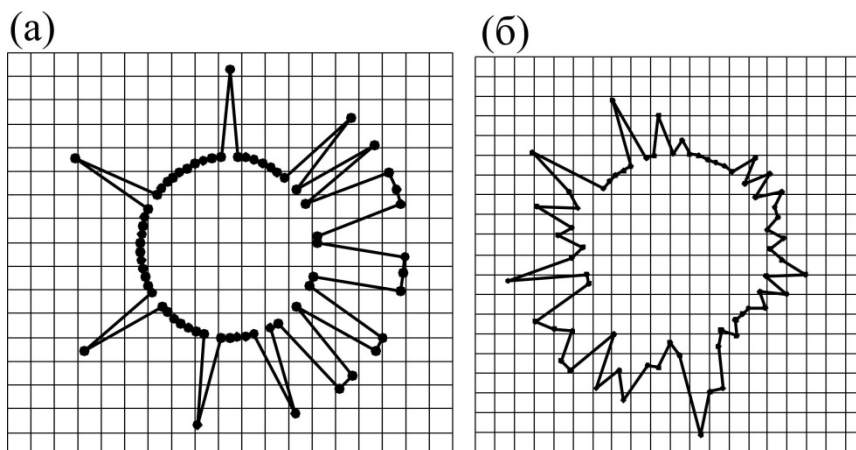


Рис. 2. Фенограммы, характеризующие индивидуальное проявление (а) и консенсусную групповую композицию частот встречаемости (б) фенотипических признаков черепа на примере обыкновенной полевки (*Microtus arvalis*)

Fig. 2. Phenograms characterizing individual expression (a) and consensus' group composition of frequencies (б) of phenes of homologous non-metric cranial characters by the example of common vole (*Microtus arvalis*)

На рис. 2б показана фенограмма, построенная по средним значениям частот встречаемости исследуемых признаков. Следует заметить, что количество и направление векторов, соответствующих изучаемым признакам, должно быть одинаковым у всех сравниваемых объектов.

Поскольку при геометрической фенограмметрии анализируются форма астеронов, а не реальных объектов, следует учитывать один важный момент. С точки зрения методов геометрической морфометрии форма двух астеронов, один из которых описывает объект с полным набором реализовавшихся признаков (т.е. все признаки в таблице исходных данных закодированы «2»), а второй с полным набором не реализовавшихся (все признаки закодированы «1»), одинакова. Такие астероны являются правильными многоугольниками с равным количеством вершин и различаются только размерами, но не формой. В процессе Прокрустовой суперимпозиции размеры центроидов этих астеронов будут приравнены к единице, и объекты станут полностью идентичными. Тем не менее, с точки зрения фенетики различия между описываемыми объектами являются максимально возможными.

Предположим, что у нас имеется четыре объекта и четыре соответствующих им астерона. У объекта 1 все признаки не проявились (в таблице данных стоят только «1»), у объекта 2 все признаки проявились (только «2»), у объекта 3, например, первый признак проявился, а остальные нет (одна «2», остальные «1») и, наконец, у объекта 4 – первый признак не проявился, а остальные проявились (одна «1», остальные «2»). После Прокрустовой суперимпозиции астероны 1 и 2 по форме различаться не будут, а астерон 3 будет *в равной мере* (т.е., например, по величине Прокрустовой дистанции) отличаться от астеронов 1 и 2. Аналогичная ситуация возникнет и с астероном 4. При этом очевидно, что на самом деле наиболее сходны по проявившимся признакам астероны 1 и 3, а также 2 и 4. То есть в данной ситуации величина Прокрустовой дистанции, являющаяся метрикой при анализе различий формы объектов, не пропорциональна величине истинных различий между объектами. В результате статистические оценки сходства и различий объектов в выборке, полученные методом Прокрустовой суперимпозиции, будут существенно смещены. Предположительно, величина смещения будет выше при исследовании групп со стабильным проявлением признаков и ниже в ситуациях, когда все признаки варьируют.

Авторы предлагают два основных способа, с помощью которых можно избежать смещений статистических оценок в геометрической фенограмметрии. Первый способ может быть реализован в программах, где возможно вернуть исходный размер центроида объекта после Прокрустовой суперимпозиции. Например, в программе PAST (Hammer et al., 2001). При процедуре трансформации исходных координат в меню "Transform"→"Procrustes (2D/3D)" следует выбирать опцию "Keep size". Тогда после Прокрустовой суперимпозиции всем астеронам будут возвращены их исходные размеры. В геометрической фенограмметрии различия между астеронами существенны как по форме, так и по размерам. Сохраняя информацию об исходных размерах, мы получим корректные статистические оценки.

Такой же способ, но требующий дополнительную ручную процедуру возвращения объектам исходных размеров центроида, возможен в программе MorphoJ 1.6d (Klingenberg, 2011). Для этого следует осуществить экспорт файла, полученного после Прокрустового анализа (в меню File опция "Export Dataset"), а затем вручную в MS Excel произвести умножение всех строчных

значений прокрустовых координат на соответствующие им значения CS. После этого полученный текстовый файл вновь требуется импортировать в программу MorphoJ (в меню File опция "Import Shapes Changes Vectors") и далее использовать как откорректированную версию исходных прокрустовых координат. Наряду с коррекцией смещения ординат данный способ обеспечивает возможность морфокартирования молекулярных и иных филогений на основе композиций неметрических признаков (Васильев и др., 2013) в программе MorphoJ.

Ф. Миттерэеккер с соавторами (Mitteroecker et al., 2004) рекомендуют процедуру умножения прокрустовых координат на натуральные логарифмы размеров центроида соответствующих им объектов. При этом появляется возможность, сохраняя форму объектов (shape), придавать им ещё и компоненту размера (size), создавая особое Прокрустово пространство фигур (size–shape space). Показано, что, так же, как и в пространстве форм, в подобном пространстве образов наблюдается нормальная сферическая вариация распределения объектов вокруг консенсусной средней формы. Поэтому мы предлагаем для исключения описанного выше смещения умножать прокрустовы координаты на соответствующие им CS или $\ln(\text{CS})$.

Второй способ избежать смещения оценок заключается в применении Букштейновой, а не Прокрустовой суперимпозиции. Идея применения этого способа принадлежит А.О. Шкурихину и Т. С. Ослиной. Не следует выбирать в качестве меток базовой линии анализируемые признаки (вершины астерона или гистограммы), иначе после суперимпозиции мы получим тот же артефакт, что был описан выше. В данном случае правильно будет использовать в качестве базовой линии две дополнительные метки, не кодирующие никаких признаков. Их добавление не повлияет на различия между исследуемыми объектами, поскольку у всех объектов в выборке координаты этих дополнительных меток будут одинаковыми. Таким образом, мы самостоятельно выравниваем все астероны (гистограммы) по размерам еще до процедуры суперимпозиции, и все различия по значащим признакам сохраняются. При таком методе астероны 1 и 2 из примера выше будут различаться. Воспользоваться Букштейновой суперимпозицией (Bookstein, 1991) можно, например, в программах PAST (Hammer et al., 2001) или IMP (Sheets, 2001).

Наконец, существует способ использовать в программе PAST непосредственные значения координат астеронов без выполнения процедуры Прокрустова анализа, рассматривая их как "квазипрокрустовы" координаты. Поясним, что в процессе создания фенограмм уже осуществлены "трансляция" = центрирование (все они имеют один и тот же центр), "масштабирование" (наибольшие возможные размеры всех многоугольников одинаковы), а также "ротация" ("гомологичные" фены имеют одинаковые направления векторов и соответствующие углы для каждого признака). При таком способе смещение невелико, доступна ординация индивидуальных и групповых композиций фенов и не теряется возможность их визуализации. Фактически данный способ почти не отличается от процедуры многомерной ординации композиций бинарных кодов встречаемости фенов методом главных компонент, предложенной авторами ранее (Васильева, 2006; Васильев, Васильева, 2009), но позволяет в программе PAST визуализировать индивидуальные и групповые композиции лишь с небольшой погрешностью.

Рассмотрим подробнее последовательные этапы процесса индивидуальной фенограмметрии на примере сравнения структуры рисунка надкрылий трех особей усача изменчивого *Brachyta interrogationis* (Coleoptera: Cerambycidae). Варьирующая часть пигментного рисунка надкрылий – перемычки (перевязи) между пятнами, местоположение которых в потенциальной структуре рисунка надкрылий строго сохраняется. Ранее нами было показано, что перемычки между пятнами проявляют себя как устойчивые состояния пороговых признаков, т.е. являются фенами (Васильев и др., 2007). Установлены несколько характерных способов

соединения пятен перемычками, нумерация местоположений которых приведена на схеме (рис. 3а).

Для каждого надкрылья определяли конкретную композицию фенов – сочетание номеров перемычек. На рисунке представлены три фенокомпозиции надкрылий, обозначенных А1–А3 (рис. 3а).

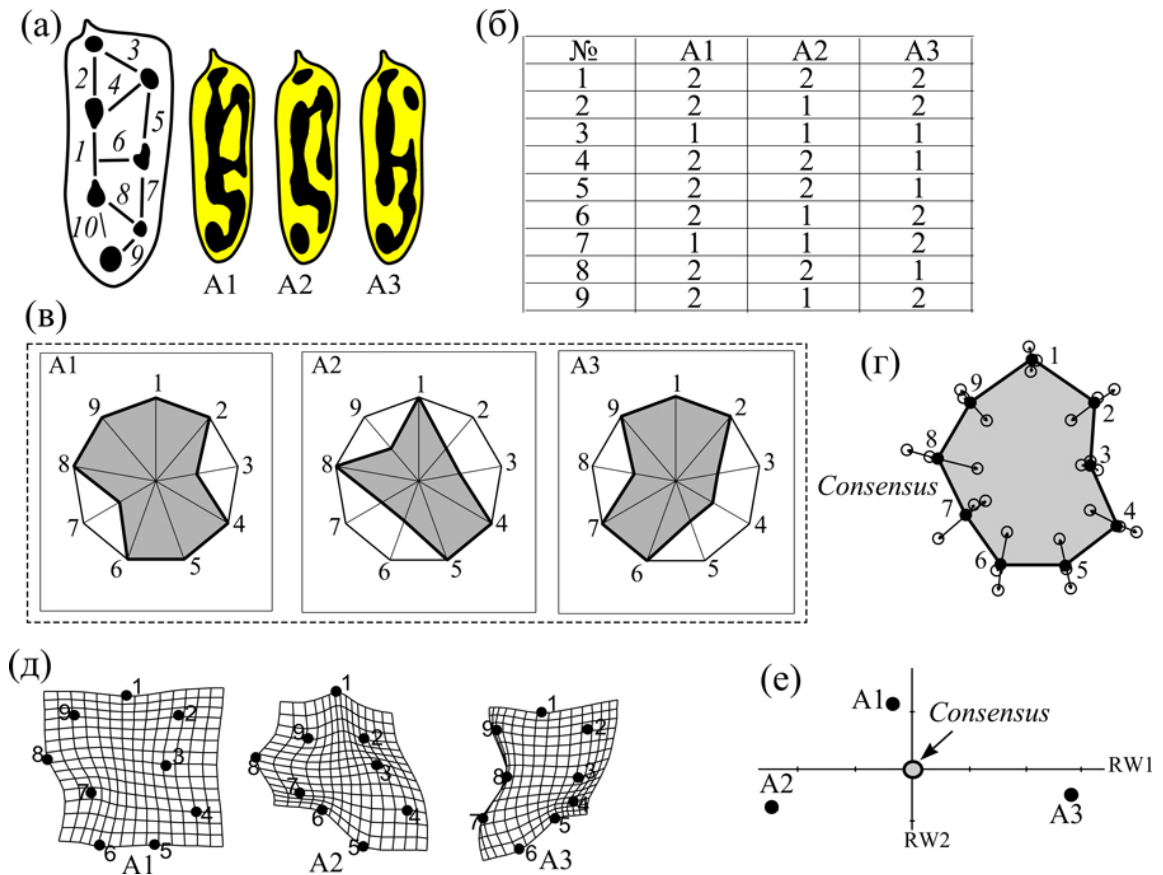


Рис. 3. Техника проведения индивидуальной фенограмметрии на примере структуры рисунка надкрылий усача изменчивого: (а) локализация потенциальных перемычек (фенов 1–9) между пятнами и три реальные фенокомпозиции (А1–А3) на правых надкрыльях; (б) таблица проявления 9 фенов (по строкам) для трех надкрылий А1–А3 (по столбцам); (в) фенограммы, характеризующие особенности структуры рисунка трех надкрылий по 9 феном; (г) усредненная (консенсусная) конфигурация ландмарков, полученная при Прокрустовой суперимпозиции трех индивидуальных фенограмм по данным tps-файла; (д) визуализация фенограмм с помощью трансформационных решеток; (е) ординация фенограмм в плоскости первых двух относительных деформаций (relative warps – RW).

Fig. 3. Procedure for individual geometric phenogrammetry by the example of pigment patterns in elytra of longhorned beetle (*Brachyta interrogationis*): (a) locations of connecting links (phenes 1–9) between spots and three real phenocompositions (A1–A3) on the right elytra; (b) table containing an appearance of 9 phenes (rowwise) for three elytra A1–A3 (columnwise) (see in text); (c) phenograms characterizing pigment patterns of three elytra by 9 phenes; (d) average configuration landmarks (consensus) obtained by Procrustes superimposition of three individual phenograms inferred from tps-file data; (e) visualization of phenograms by means of transformation grids; (e) ordination of phenograms (scatter-plot) on the plane of two first relative warps (RW).

Перемычка под номером 10 в среднеуральской популяции усача изменчивого встречается пренебрежимо редко, поэтому для упрощения структуры ее не включили в таблицу (рис. 3б). Для левого и правого надкрылий частоты обычно совпадают, несмотря на частую асимметрию проявления фенов на разных сторонах особи. В данном примере мы рассматриваем только правые надкрылья. В таблице (рис. 3б) строкам соответствуют данные о наличии того или иного из 9 фенов, а столбцам – надкрылья разных особей. Проявления соответствующих перемычек (=фенов) кодировали 2, а их отсутствие – 1. На основе этой таблицы для трех надкрылий построили индивидуальные астероны в MS Excel (рис. 3в). Можно экспортировать эти изображения в виде jpg-файлов и провести расстановку ландмарок в экранном дигитайзере tpsDig2 (Rohlf, 2017) или конвертировать исходную таблицу в tps-файл при помощи макроса TPSCreator (см. ниже). Полученный тем или иным способом tps-файл можно использовать в любой программе для геометрической морфометрии. На рис. 3г показан консенсусный астерон, полученный в результате Прокрустовой суперимпозиции. Можно визуализировать фенограммы с помощью трансформационных решеток (рис. 3д), а также провести ординацию объектов в пространстве главных компонент или относительных деформаций – relative warps – RW (рис. 3е).

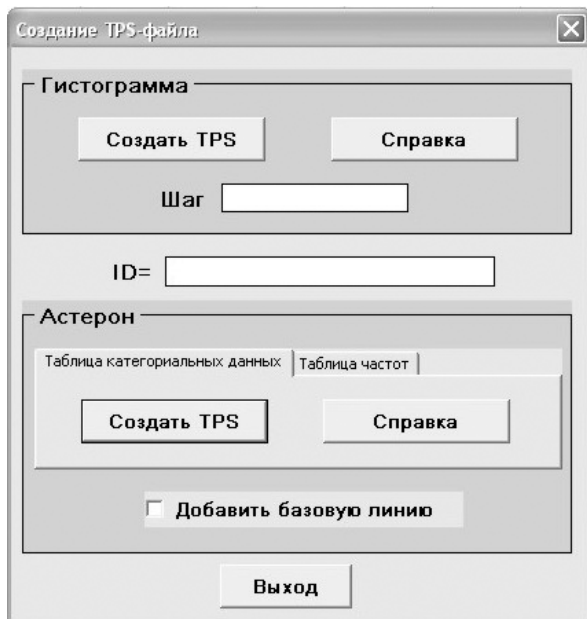
Работа в TPSCreator

А. Г. Васильев и И. А. Васильева совместно с Т. С. Ослиной разработали макрос для программы Microsoft® Office Excel. Данный макрос, названный "TpsCreator", позволяет конвертировать матрицы данных по индивидуальным проявлениям комплекса фенов неметрических признаков и таблицы частот встречаемости фенов в формат tps-файла. Для каждого объекта формируется фенограмма (астерон или гистограмм) с числом вершин (ландмарок), соответствующим числу фенов. Координаты каждой ландмарки астерона рассчитываются как координаты ее радиус-вектора, модулем которого является величина, характеризующая состояние признака.

Чтобы воспользоваться макросом TPSCreator, нужно поместить таблицу исходных данных в книгу MS Excel, содержащую данный макрос. При желании макрос можно скопировать в личную книгу макросов, тогда он будет доступен из любой открытой книги MS Excel на Вашем компьютере. В настройках безопасности MS Excel должен быть разрешен запуск макросов.

При запуске макроса появится диалоговое окно "Создание TPS-файла" (рис. 4а). Для создания tps-файла на основе матрицы, характеризующей индивидуальное проявление гомологичных фенов неметрических признаков в данном окне нужно выбрать закладку "Таблица категориальных данных". Строкам таблицы исходных данных должны соответствовать изучаемые объекты, столбцам – признаки (рис. 4б). Состояние исследуемых признаков в данном случае можно кодировать любыми целыми числами (0 и 1, 1 и 2, 10 и 20 и т.д.). Кроме того, возможно создать tps-файл, когда альтернативных состояний признака более двух. В этом случае, состояния признака также должны быть кодированы целыми числами (например, 1, 2, 3, 4, 5 в случае пяти возможных состояний). В поле "ID=" можно ввести общий идентификатор для особей в выборке. Для этого можно использовать буквы латинского алфавита и любые символы, кроме пробела. Если поле оставить пустым, объекты в tps-файле будут пронумерованы по порядку, начиная с нуля. Если требуется базовая линия Букштейна, поставьте галочку в соответствующем поле. При необходимости можно воспользоваться справкой. Затем нужно выделить таблицу без шапки (рис. 4б) и воспользоваться кнопкой "Создать TPS" в нужном блоке – Астерон или Гистограмма (такая фенограмма выглядит как зазубренный сверху прямоугольник), в появившемся окне указать имя

и папку назначения для создаваемого файла и нажать кнопку "Сохранить". В выбранной папке появится trs-файл.



(а)

(б)

Рис. 4. Диалоговое окно TPSCreator (а) и образец ввода индивидуальных данных о проявлении фенов (б) с выделением области листа электронной таблицы для формирования trs-файла.
Fig. 4. The dialog window of TPSCreator (а) and the example of individual data input of phenes appearances in the table (б) with highlighting spreadsheet's area for creation of trs-file.

Для создания trs-файла из таблицы частот, нужно выбрать соответствующую закладку диалогового окна (рис. 4а). Таблица исходных данных должна быть организована следующим образом (рис. 5).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		sample1		sample2		sample3		sample4	
2	phen1	7	105	19	76	37	90	44	100
3	phen2	12	104	24	76	18	86	38	100
4	phen3	34	105	12	75	5	90	2	98
5	phen4	54	105	33	76	79	88	98	100
6	phen5	22	101	12	76	3	90	11	100
7	phen6	67	105	40	73	38	90	28	100
8	phen7	1	105	14	76	8	90	10	99
9	phen8	0	105	5	74	17	90	39	100
10	phen9	16	105	27	76	46	89	65	98
11	phen10	11	105	16	76	22	89	18	98

Рис. 5. Лист MS Excel с выделенной областью таблицы введенных групповых данных для формирования trs-файла.

Fig. 5. The MS Excel highlighted spreadsheet's area of group data input for creation of trs-file.

В шапке таблицы должны быть даны названия (номера) выборок, они будут представлены в trs-файле. Названия выборок лучше указывать на латинице. Для каждого фено неметрического

признака должно быть указано число объектов, у которых он обнаружен, а также объём данной выборки. Например, в таблице на рис. 5 признак 1 (fen1) встречается у 7 объектов из 105 в выборке 1 (sample1) и т.д. Как и в предыдущем случае, можно добавить базовую линию. Далее нужно выделить таблицу без шапки (рис. 5), кликнуть по кнопке "Создать TPS" в блоке Астерон или Гистограмма (по выбору), указать имя и папку назначения для файла и нажать кнопку "Сохранить". В выбранной папке появится tps-файл.

Полученные tps-файлы можно анализировать различными статистическими методами в любых программах для геометрической морфометрии. Например, можно провести ординацию индивидуальных фенограмм методом относительных деформаций (relative warps – RW). На рис. 6 наряду с 10 индивидуальными астеронами, построенными по 25 признакам, изображена консенсусная (усредненная) групповая фенограмма. Поскольку в данном случае приведено рассеивание ординат объектов на плоскости вдоль первой и второй относительных деформаций (RW1 и RW2), а не в трехмерном пространстве, проекции некоторых из них, заметно различающихся по конфигурации, оказываются расположенными вблизи друг от друга. При необходимости по матрице значений всех RW с помощью кластерного анализа можно построить дендрограмму, точнее отражающую степень реального структурного сходства особей в выборке. Наиболее фенетически близкие (сходные по структуре) объекты будут при этом сгруппированы в общие субкластеры.

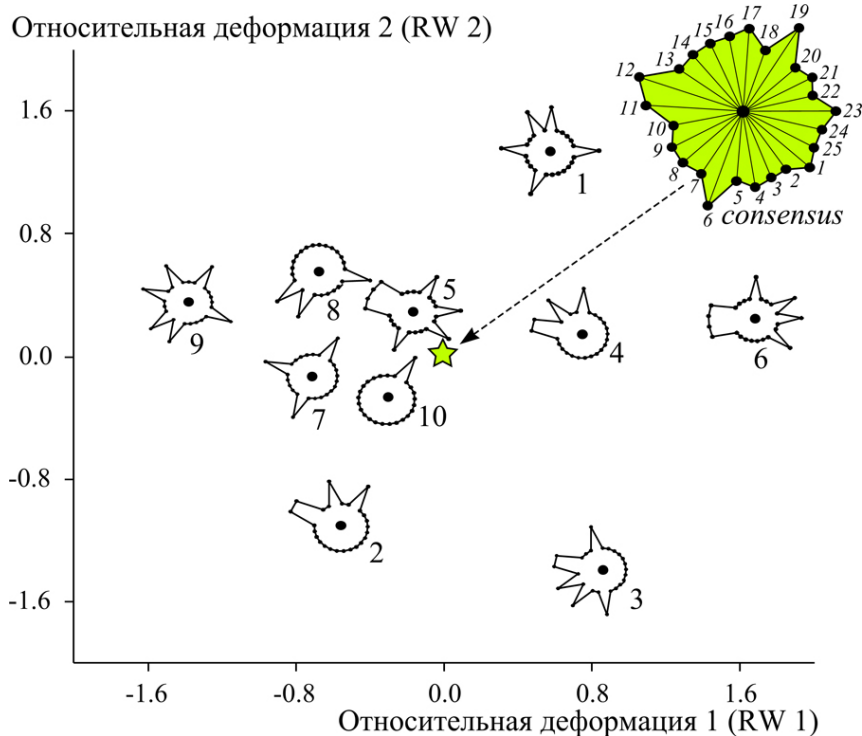


Рис. 6. Результаты ординации индивидуальных фенограмм, или астеронов, на примере выборки обыкновенной полевки (*Microtus arvalis*) ($n = 10$) методом относительных деформаций (RW) и изображение консенсусной (средней) конфигурации ландмарков (1–25)

Fig. 6. Results of ordination of individual phenograms (or asterons) by the example of common vole (*Microtus arvalis*) sample ($n = 10$) inferred from the relative warps analysis with plotting consensus (average) landmarks (1–25)

Что позволяет получить такая, на первый взгляд, изощренная техника конвертирования встречаемости фенев и морф в фенограммы для геометрической морфометрии? Не проще ли просто использовать частоты фенев или морф и сравнивать выборки традиционными методами фенетики? Вероятно, правильный ответ заключается в том, что так и следует поступать во многих случаях. Однако существуют задачи, при решении которых геометрическая фенограмметрия будет иметь заметное преимущество. Предложенный подход в первую очередь позволяет визуализировать структурные особенности групп, предоставляет уникальную возможность количественно сравнивать между собой в структурном отношении фенокомпозиции отдельных особей, визуализировать их различия, а также оценивать дистанции между ними. Методы фенетики популяций ранее не позволяли сравнивать индивидуальные сочетания (композиции) фенев ("фенокомплексы" по терминологии проф. Н. И. Лариной) и опирались в основном на межгрупповые сравнения. После разработки методов многомерной ординации индивидуальных композиций фенев в общем морфопространстве (Васильев, Васильева, 2009) эта проблема в рамках фенетики и популяционной мерономии в значительной степени была решена, за исключением задачи визуализации индивидуальных фенетических различий. Предложенная техника геометрической фенограмметрии позволяет решать и эту задачу.

Как получить TPSCreator?

Для получения макроса TPSCreator для Microsoft® Office Excel можно направить запрос авторам по электронной почте vag@ipae.uran.ru или самостоятельно скачать файл с сайта лаборатории эволюционной экологии ИЭРиЖ УрО РАН – URL: <http://ipae.uran.ru/lab106/TPSCreator.zip> (раздел "Наши разработки"). Авторы декларируют, что подготовили макрос для решения собственных задач и не несут ответственности за его использование кем-либо.

Ссылка на макрос TPSCreator

Библиографическую ссылку при использовании TPSCreator рекомендуем представлять в следующей форме: Ослина Т.С., Васильев А.Г., Васильева И.А. TPSCreator – макрос Microsoft® Office Excel для конвертации таблиц индивидуальной и групповой встречаемости фенев в формат tps-файла. 2018 [URL: <http://ipae.uran.ru/lab106/TPSCreator.zip>]. Рекомендуется также следующая англоязычная ссылка: Oslina T.S., Vasil'ev A.G., Vasil'eva I.A. TPSCreator – the Microsoft® Office Excel macros for conversion of phenogram in tps-file format. 2018 [URL: <http://ipae.uran.ru/lab106/TPSCreator.zip>].

Библиография

- Васильев А.Г.* 1988. Эпигенетическая изменчивость: неметрические пороговые признаки, фены и их композиции // Фенетика природных популяций. М.: Наука. С.158–169.
- Васильев А.Г.* 2005. Эпигенетические основы фенетики: на пути к популяционной мерономии. Екатеринбург: Изд-во "Академкнига". 640 с.
- Васильев А.Г.* 2009. Феногенетическая изменчивость и популяционная мерономия // Журн. общ. биол. Т. 70, № 3. С. 195–209.
- Васильев А.Г., Васильева И.А.* 2009. Гомологическая изменчивость морфологических структур и эпигенетическая дивергенция таксонов: Основы популяционной мерономии. М.: Товарищество научных изданий КМК. 511 с.
- Васильев А.Г., Васильева И.А., Шкурихин А.О.* 2018. Геометрическая морфометрия: от теории к практике. М.: Товарищество научных изданий КМК. 471 с.

- Васильев А.Г., Васильева И.А., Большаков В.Н.* 2007. Феногенетическая изменчивость и методы ее изучения: Учебн. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 279 с.
- Васильев А.Г., Васильева И.А., Войта Л.Л., Литвинов Ю.Н.* 2013. Морфологическое картирование молекулярных филогений: оценка филогенетического сигнала разных систем признаков методами геометрической морфометрии // Молекулярно-генетические подходы в таксономии и экологии: тез. докл. науч. конф., 25-29 марта 2013 г., Ростов-на-Дону, Россия / Вавилов. об-во генетиков и селекционеров и др.; редкол.: Д.Г. Матишов (отв. ред.) и др. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН. С. 25.
- Васильев А.Г., Васильева И.А., Городилова Ю.В., Темботова Ф.А., Амшокова А.Х.* 2017а. Сопряженная высотная изменчивость кавказской и малой лесной мышей на Западном Кавказе: многомерный морфометрический и неметрический анализ // Горные экосистемы и их компоненты: Мат-лы VI Всероссийской конференции с международным участием, посвященной Году экологии в России и 100-летию заповедного дела в России (Нальчик, 11-16 сентября 2017 г.) / под ред. член-корр. РАН Ф.А. Темботовой. Махачкала: АЛЕФ. С. 133–134.
- Васильева И.А.* 2006. Закономерности гомологической изменчивости морфологических признаков грызунов на разных этапах эволюционной дивергенции. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН. 46 с.
- Васильева И.А., Васильев А.Г.* 2017. Гомологическая изменчивость неметрических признаков и морфокартирование молекулярной филогении на примере двух семейств грызунов // Материалы III Международной конференции «Современные проблемы биологической эволюции» к 130-летию со дня рождения Н.И. Вавилова и 110-летию со дня основания Государственного Дарвиновского музея. 16–20 октября 2017 г. С. 296–298.
- Ослина Т.С., Васильев А.Г., Васильева И.А.,* 2018. TPSCreator – макрос Microsoft® Office Excel для конверсии фенограмм в формат tps-файла. [URL: <http://ipae.uran.ru/lab106/TPSCreator.zip>] (дата обращения: 12.03.2018).
- Серебровский А.С.* 1970. Генетический анализ. М.: Наука. 338 с.
- Тимофеев-Ресовский Н.В., Яблоков А.В.* 1973. Фены, фенетика и эволюционная биология // Природа. № 5. С.40–51.
- Тимофеев-Ресовский Н.В., Яблоков А.В., Глотов Н.В.* 1973. Очерк учения о популяции. М.:Наука. 278 с.
- Яблоков А.В.* 1980. Фенетика. Эволюция, популяция, признак. М.: Наука. 135 с.
- Яблоков А.В., Ларина Н.И.* 1985. Введение в фенетику популяций. М.: Высш.шк. 160 с.
- Berry R.J., Searle A.G.* 1963. Epigenetic polymorphism of the rodent skeleton // Proc. Zool. Soc. Lond. Vol.140. P. 557–615.
- Bookstein F.L.* 1991. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology / Cambridge Univ. Press, New York. 435 p.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D.* 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. Vol. 4. № 1. 1–9 p.
- Klingenberg C.P.* 2011. MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics // Molecular Ecology Resources. Vol. 11. P. 353–357.
- MacLeod N., Krieger J., Jones K.E.* 2013. Geometric morphometric approaches to acoustic signal analysis in mammalian biology // Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy. Vol. 24. № 1. P. 110–125.
- Mitteroecker P., Gunz P., Bernhard M., Schaefer K., Bookstein F.L.* 2004. Comparison of cranial ontogenetic trajectories among great apes and humans // J. Human Evol. Vol.46. P.679–698.
- Oslina T.S., Vasil'ev A.G., Vasil'eva I.A.* 2018. TPSCreator – the Microsoft® Office Excel macros for conversion of phenogram in tps-file format. [URL: <http://ipae.uran.ru/lab106/TPSCreator.zip>].

Rohlf F.J. 2017. TpsDig2, digitize landmarks and outlines, version 2.30 / Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook (program).

Rohlf F.J., Slice D. 1990. Extension of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks // *Syst. Zoology*. Vol. 39. No. 1. P. 40–59.

Sheets H.D. 2001. IMP software series / Dept. of Physics, Canisius College, Buffalo, NY. [URL: <http://www.canisius.edu/~sheets/morphsoft.html>].

Zelditch, M.L., Swiderski D.L., Sheets H.D., Fink W.L. 2004. Geometric morphometrics for biologists: a primer. New York: Elsevier Academic Press. 437 p.

Благодарности

Авторы благодарят за конструктивное обсуждение метода, критические замечания и высказанные полезные предложения научного сотрудника лаб. эволюционной экологии ИЭРиЖ УрО РАН, к.б.н. А. О. Шкурихина.

Авторы

Ослина Татьяна Сергеевна – научный сотрудник лаб. эволюционной экологии ИЭРиЖ УрО РАН, к.б.н., e-mail: oslina_ts@ipae.uran.ru

Васильев Алексей Геннадьевич – зав. лаб. эволюционной экологии ИЭРиЖ УрО РАН, д.б.н., проф., e-mail: vag@ipae.uran.ru

Васильева Ирина Антоновна – ведущий научный сотрудник лаб. эволюционной экологии ИЭРиЖ УрО РАН, д.б.н., e-mail: via@ipae.uran.ru

**TPSCreator – the Microsoft ® Office Excel macros for conversion of phenogram
in tps-file format (User's Guide)**

2018 © T. S. Oslina, A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva

Institute Plant and Animal Ecology, Ural Branch of Russian Academy Science, Yekaterinburg

Laboratory of evolutionary ecology

e-mail: vag.ipae.uran.ru

The authors present original macros TPSCreator for phenetics and geometric phenogrammetry combining possibilities of phenetics with geometric morphometrics. Following to this approach we suggest manifestations of phenes described by phenograms – petal (or stellar) diagrams similar to Serebrowsky's polygons (Serebrowsky, 1970) which we named as asterons – to analyze by mean of geometric morphometrics (also it is possible using phenograms as histograms). Individual expression and group frequencies of phenes can be studied based on analysis of variability among asteron's configurations using Procrustes analysis. When composing individual phenograms (asterons or histograms) we coded the presence of the phene at respective side (left or right) as 2, and the absence – as 1, and then digitized them using the screen digitizer program tpsDig2 (Rohlf, 2017) or by the author's macros of Microsoft Excel "TpsCreator" (Vasil'ev, Vasil'eva, Oslina, 2017). Individual or group phenograms (asterons or histograms) we converted to the traditional tps-file's format for geometric morphometrics. After that we calculated the Procrustes coordinates of phenograms (asterons or histograms) by means of generalized Procrustes analysis (GPA). Further we multiplied the Procrustes coordinates by CS (centroide size) or $\ln(\text{CS})$, and carried out multivariate ordination of shape-size modified coordinates by standard multivariate methods (Principal component, Principal coordinate, and Canonical analyses). The methods of geometric morphometrics make possible visualization of phenogram warps. The advantages of the new methodology consist not only in that it permits individual classification and visualization of the compositions of phenes within populations that were not previously permitted under routine phenetic comparisons, but it also makes possible to use the methods of PLS analysis for assessing covariance of the phenocompositions with other biological characters among the same objects. Furthermore the new method makes possible to map asteron's (or histogram's) shapes onto existing phylogenetic trees and estimate phylogenetic signal in non-metric data.

To cite the use TPSCreator macros in a publication, please list it in your bibliography in the following form:

Oslina T.S., Vasil'ev A.G., Vasil'eva I.A. TPSCreator – the Microsoft ® Office Excel macros for conversion of phenogram in tps-file format. 2018. [URL: <http://ipae.uran.ru/lab106/TPSCreator.zip>].