

DOI: 10.31862/2500-2961-2018-4-40-48

**Д.Д. Сластунов<sup>\*</sup>, А.К. Сытин<sup>\*\*</sup>, Л.В. Рязанова<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет,  
194021 г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>\*\*</sup> Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН,  
197376 г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

## Компьютерные методы анализа фенетических признаков и их применение в систематике однолетних астрагалов<sup>1</sup>

Одним из методов современной таксономии является компьютерная систематизация и анализ данных. Разработка и применение оригинальных методов компьютерного анализа таксономической значимости фенетических признаков 33 видов однолетних астрагалов, встречающихся на территории бывшего СССР, позволила решить ряд таксономических проблем и приблизиться к осмыслению филогении некоторых групп, а также разработать подходы к формализации фенетических признаков. В ходе исследований были также опробованы некоторые вспомогательные технологии, призванные снизить субъективность таксономического исследования и повысить адекватность получаемых данных. Результатом стал многоходовый диагностический ключ, а также иллюстрированная база данных – атлас по рассматриваемой группе таксонов, в котором все виды были описаны по 72 рядам признаков, объединенным в 9 групп: биоморфология растения, побег, стебель, лист, листочек, соцветие, цветок, плод и семена. В базе данных воспроизведены изображения большого количества образцов по исследуемой группе таксонов, в том числе аутентиков, хранящихся в фондах Гербария Ботанического института РАН. Исследования имеют монографический характер:

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках реализации государственного задания согласно плану научно-исследовательской работы Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (№ АААА-А19-119031290052-1 «Сосудистые растения Евразии: систематика, флора, растительные ресурсы», № АААА-А18-118022090078-2 «Гербарные фонды БИН РАН (история, сохранение, изучение и пополнение)») и при финансировании по гранту РФФИ № 15-04-06981.

создается конспект однолетних астрагалов на территории бывшего СССР, уточняют сведения об их распространении, экологии и морфологии.

**Ключевые слова:** однолетние астрагалы, база данных растений, анализ данных в таксономии, таксономия, формализации фенетических признаков.

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Сластунов Д.Д., Сытин А.К., Рязанова Л.В. Компьютерные методы анализа фенетических признаков и их применение в систематике однолетних астрагалов // Социально-экологические технологии. 2018. № 4. С. 40–48.

DOI: 10.31862/2500-2961-2018-4-40-48

**D.D. Slastunov<sup>\*</sup>, A.K. Sytin<sup>\*\*</sup>, L.V. Rjazanova<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup> St. Petersburg State Forestry University,  
St. Petersburg, 194021, Russia

<sup>\*\*</sup> Komarov Botanical Institute of Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, 197376, Russia

## Computer methods of analysis of phenetic characters and their application in taxonomy of annual astragali<sup>2</sup>

One of the methods of modern taxonomy is computerized data systematization and analysis. The development and application of original computer-aided analysis of the taxonomic significance of the phenetic characters of 33 species of annual milkvetches found on the territory of the former USSR allowed solving a number of taxonomic problems and moving closer to understanding the phylogeny of some groups, and developing approaches to formalizing the phenetic characters. In the course of the research, some assistive technologies were also tried, designed to reduce the subjectivity of taxonomic research and improve the adequacy of the data obtained. The result was a multi-input diagnostic key,

<sup>2</sup> The present research was fulfilled as part of the implementation of the state task in accordance with the plan of the research work of the Komarov Botanical Institute of RAS (№ AAAA-A19-119031290052-1 “Vascular plants of Eurasia: systematics, flora, plant resources”, № AAAA-A18-118022090078-2 “Herbarium BIN funds of the Russian Academy of Sciences (history, preservation, study and replenishment)”) and with funding from grant of the Russian Foundation for Basic Research No. 15-04-06981.

as well as an illustrated database – an atlas for the considered taxonomic group, in which all species were described by 72 rows of characters combined into 9 groups: plant biomorphology, shoot, stem, leaf, leaflet, inflorescence, flower, fruit and seeds. The database reproduces images of a large number of samples from considered taxonomic group, including the type samples stored in the Herbarium of the Komarov Botanical Institute (LE). The studies are monographic in nature – a summary of annual milkvetches in the territory of the former USSR is created, clarifying information about their distribution, ecology and morphology.

**Key words:** annual astragali, plant database, taxonomy data analysis, taxonomy, formalization of phenetic traits.

CITATION: Slastunov D.D., Sytin A.K., Rjazanova L.V. Computer methods of analysis of phenetic characters and their application in taxonomy of annual astragali. *Socialno-ecologicheskie tehnologii*. 2018. № 4. Pp. 40–48.

Таксономическое разнообразие растений в настоящее время исследуется разными методами, и все большую роль играют методы компьютерного анализа данных [Компьютерная система..., 2014]. Молекулярная систематика давно освоила методы математической статистики, но классическая морфологическая систематика несколько ограничена в применении методов математической статистики в связи с использованием т.н. «нечисловых признаков». Авторами в 2014–2017 гг. выполнялся проект «Компьютерный анализ фенетических признаков однолетних астрагалов (*Astragalus* L., Fabaceae)» (грант РФФИ №15-04-06981), в рамках которого была осуществлена попытка применения новых методов анализа данных при составлении ключа и формализации фенетических признаков, а также оценки их таксономической значимости [Базы данных..., 2018; Сытин и др., 2018].

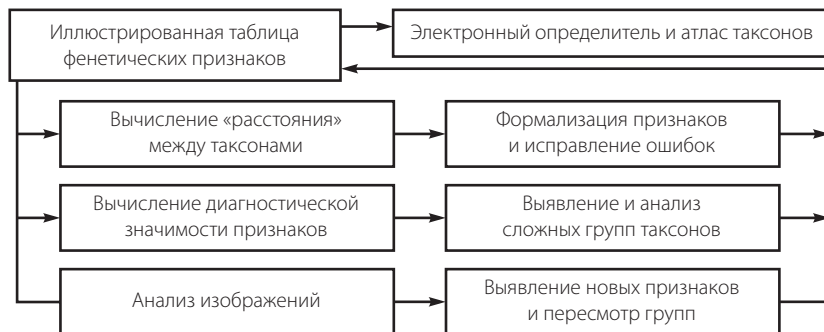
Автогамные однолетники-эфемеры – весьма специализированная группа растений, формировавшаяся в аридном климате Земли. Однолетние астрагалы Старого света можно условно разделить на две географические группы – обитающие в бассейне Средиземного моря и другие, свойственные пустынному поясу Евразии, ареалы которых охватывают огромную территорию от Сахары до Гималаев, при этом виды сохраняют поразительную константность своей морфо-структурной организации. В огромном роде *Astragalus* однолетники сравнительно немногочисленны (около 90 видов), но чрезвычайно оригинальны благодаря своеобразным морфологическим признакам плодов и соцветий, не встречающихся у многолетних представителей рода *Astragalus*.

Таковы, например, вооруженные бобы астрагалов секции *Sewerzowia* (Regel et Schmalh.) Bunge, на основании которых выделяли особый род *Sewerzowia* Regel et Schmalh. Повышенное внимание к уникальности подобных признаков легло в основу таксономической классификации однолетних астрагалов, в которой преобладают моно-(олиго)типные секции. Начиная работу, авторы предполагали, что генетическая природа наследственных признаков имеет дискретный альтернативный характер проявления, подобный менделевским закономерностям, выявленным на основании классических опытов с горохом. Однако результаты анализа изменчивости конкретных признаков заставляют предполагать более сложный механизм экспрессии их проявления, в том числе – обусловленный влиянием среды на развитие организма в онтогенезе. Сравнение с данными исследования молекулярной систематики однолетних астрагалов [Nasim Azani et al., 2017] указывает на принципиальные различия в оценке значимости признаков в рамках концепций молекулярной и морфологической систематики.

## Материалы и методы

В разработке подходов к проблеме типологии и формализации биологического разнообразия была принята меронимическая модель, наиболее универсально описывающая уровни организации живых систем. Концепция систематического признака, опирающаяся на эту модель, может быть наиболее адекватно описана математическими методами. Использование подобных методов в контексте электронных вычислительных систем представилось одним из наиболее эффективных методов изучения природы биологических признаков.

Методика работы представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема методики работы

**Fig. 1.** Scheme of the method of work

На *первом этапе* проводилось составление таблицы фенетических признаков.

Вначале была проведена предварительная формализация терминов описательной морфологии и фенетических признаков для исследуемой группы, далее в специально разработанное программное обеспечение было введено подробное морфологическое описание каждого таксона на основе анализа наиболее типичных образцов (в том числе аутентиков) по более чем 70 рядам признаков, объединенных в 9 групп (биоморфология растения, побег, стебель, лист, листочек, соцветие, цветок, плод, семена). Вместе с вводом текстовых данных проводился ввод изображений, иллюстрирующий каждый рассматриваемый признак для каждого таксона, были приведены сканы аутентичных образцов. Дополнительно к признакам, которые могли неоднозначно трактоваться другими исследователями, вводились текстовые комментарии. Унификация терминологии вырабатывалась путем живых дискуссий.

На *втором этапе* массив введенных данных анализировался различными методами.

*Вычисление «расстояния» между таксонами.* Расстояние между двумя таксонами вычислялось на основе взвешивания набора совпадающих признаков, каждый из которых, в свою очередь, взвешивался по алгоритму оценки диагностической значимости признака. Алгоритм взвешивания был построен таким образом, что стало возможным вычисление расстояний по нечисловым признакам [Орлов, 2004], что позволило преодолеть ограничения числовой статистики.

*Вычисление диагностической значимости признаков.* Вычисление производилось по алгоритму, оценивающему уникальность проявления признака для каждого таксона относительно других признаков, а также по его кластеризирующей способности по отношению к рассматриваемой группе таксонов.

*Анализ изображений.* Сравнительный анализ изображений органов в пространстве возможностей их трансформаций (например, изменений формы листочков вдоль оси листа), с целью ревизии формулировок признаков, а также анализ проявления признаков одного ряда по всем таксонам группы.

Трудность изучения однолетних астрагалов сопряжена с чрезвычайно мелкими размерами цветка, а также выростов экзокарпия, характера и размеров трихом, наличия железок и т.д. Для решения этой задачи были

применены методы макрофотографии с размером кадра до 1 мм и разрешением до 45 000 dpi, а также фотографирование препарированных цветков под слоем воды. Были разработаны программные инструменты, облегчающие сравнительный анализ изображений.

Комбинация этих подходов с методами классической морфологической систематики приводила к следующим результатам.

#### 1. Формализация признаков и исправление ошибок ввода.

Выстраивая иерархию значимости признаков и получая взвешенные сходства таксонов, программные инструменты выявляли неточности в заполнении таблицы признаков, т.к. критический анализ выявленных сходств и диагностической значимости признаков с позиций эмпирического опыта систематиков по данной группе приводил к коррекции рядов признаков, их исключению или разделению на несколько новых рядов.

#### 2. Выявление и анализ сложных групп таксонов.

Компьютерный анализ позволил дифференцировать близкие таксоны внутри рассматриваемой группы, т.к. различия, выявляемые в ходе такого анализа, независимы от субъективного мнения систематика и помогают рассмотреть соотношения в группе с новой точки зрения.

#### 3. Выявление новых признаков и пересмотр группы.

Многие фенетические признаки являются комплексами элементарных характеристик, которые сложно выразить в короткой текстовой формулировке. Только визуальный сравнительный анализ позволяет четко формализовать подобные признаки, исключая двойные толкования и недопонимание, обусловленное субъективизмом взглядов отдельного систематика. Применение данного метода вместе с анализом взвешенных сходств таксонов позволяет выделить новые признаки, рассмотрение которых в итоге может привести к пересмотру систематики всей группы. Комплексные исследования, сочетающие данный сравнительно-морфологический метод и полевые наблюдения, выявили ряд тонких отличий, в частности доказали самостоятельность *Astragalus oxyglottis* Steven ex M. Bieb. и *A. psiloglottis* Steven ex DC., как оказалось, дифференцированных географически и морфологически видов [Сытин, Сластунов, 2018]. По всей вероятности, дальнейшие исследования обнаружат внутривидовые, географически локализованные расы.

Сопоставление полученных данных с результатами молекулярной систематики, в целом непротиворечивые, позволяют приблизиться к проблеме экспрессии признаков. В частности, признак вооруженных бобов, свойственный видам секции *Sewerzowia* (Regel et Schmalh.) Lipsky: *A. vicarius*, *A. schmalhausenii*, *A. compositus*, – которому в классической систематике придается большое таксономическое значение,

вплоть до рассмотрения секции в ранге рода, в молекулярной систематике незначителен.

Следующий этап работы состоял в расширении выборки исследуемых образцов. Для этого было произведено сканирование нескольких сотен образцов наиболее дискуссионных таксонов однолетних астрагалов из фондов Гербария БИН РАН и последующий анализ их основных признаков. Данная работа была выполнена в рамках создания коллекционной базы данных Гербария высших растений БИН РАН (LE). Возможность быстрого составления выборки необходимых образцов и просмотра их изображений в высоком качестве (до 600 dpi) позволила дополнительно уточнить полученные в таблице фенетических признаков данные и разрешить некоторые возникшие на первых этапах работы проблемы.

## Результаты

Полученные результаты изменяли конфигурацию и содержание таблицы фенетических признаков, и, таким образом, работа по уточнению данных могла вестись циклически. Это в конечном счете позволило добиться высокой адекватности описаний рассматриваемых таксонов и убедиться в эффективности метода.

Итогом работы стали электронный определитель ([http://try.taxon.pro/#!base0013/stand\\_opred](http://try.taxon.pro/#!base0013/stand_opred)) и иллюстрированный атлас таксонов (<http://try.taxon.pro/#!base0013/browser>). Атлас позволяет исследовать отдельные таксоны на основе морфологических характеристик и иллюстраций, упорядоченных по рядам признаков, а также содержит список таксонов, наиболее близких к данному с точки зрения алгоритмов анализа. В атласе можно анализировать всю совокупность таксонов по одному ряду признаков, что позволяет выявить изменчивость и трансформацию данного ряда признаков. Определитель является многоходовым и иллюстрированным, а также содержит алгоритмы выявления ошибок при вводе данных. Доступен к применению также и упрощенный пошаговый определитель, выводящий признаки в порядке убывания значимости для выбранной группы, что позволяет идентифицировать образец наиболее быстрым путем, при этом отсутствие у определяемого образца некоторых органов не мешает определению.

Следует отметить, что все исходные данные (изображения образцов и таблица фенетических признаков) связаны одной централизованной интерактивной компьютерной системой. Интерактивная связь позволяет вести диалог с пользователем, способствуя корректировке информации.

Компьютерный метод обработки и анализа информации о фенетических признаках продемонстрировал ряд дополнительных преимуществ: скорость и эффективность идентификации растений с применением компьютерного ключа выше, чем у традиционных определительных ключей; использование большого числа иллюстративных материалов повышает точность определения; возможность статистической обработки полученных данных позволяет выстраивать ряды параллельной изменчивости, что имеет существенное теоретическое и практическое значение.

#### Библиографический список / References

1. База данных и электронный многоходовый ключ для определения однолетних астрагалов (*Astragalus* L., Fabaceae): методы и итоги / Сытин А.К., Рязанова Л.В., Сластунов Д.Д., Хмарик А.Г. // Ботаника в современном мире. Труды XIV съезда Русского ботанического общества. Махачкала, 2018. Т. 1. С. 89–91. [Sytyin A.K., Ryazanova L.V., Slastunov D.D., Khmarik A.G. Database and electronic multi-entry key for identifying annual milkvetches (*Astragalus* L., Fabaceae): Methods and results. *Botanika v sovremennom mire*. Proceedings of the XIV Congress of the Russian Botanical Society. Makhachkala, 2018. Vol. 1. Pp. 89–91.]
2. Балковский Б.Е. Цифровой политомический ключ для определения растений. Киев, 1964. [Balkovskiy B.Ye. Tsifrovoy politomicheskiy klyuch dlya opredeleniya rasteniy [Digital polytomic key for identifying plants]. Kiyev, 1964.]
3. Компьютерная система Taxon.pro для идентификации и исследования биологических таксонов в сети интернет / Хмарик А.Г., Сластунов Д.Д., Орлова Л.В. и др. // Растительный мир Азиатской России. 2014. Вып. 2. С. 79–84. [Khmarik A.G., Slastunov D.D., Orlova L.V. et al. Computer system Taxon.pro for identification and research of biological taxa on the Internet. *Flora of Asian Russia*. 2014. Vol. 2. Pp. 79–84.]
4. Международная программа создания базы данных и информационной службы по бобовым ILDIS / Бисби Ф.А., Росков Ю.Р., Сытин А.К., Яковлев Г.П. // Ботанический журнал. 1992. Т. 77. № 6. С. 43–48. [Bisbey F.A., Roskov Yu.R., Sytyin A.K., Yakovlev G.P. International program for creating a database and information service on bean ILDIS. *Botanical journal*. 1992. Vol. 77. № 6. Pp. 43–48.]
5. Орлов А.И. Нечисловая статистика. М., 2004. [Orlov A.I. Nechisllovaya statistika [Non-numerical statistics]. Moscow, 2004.]
6. Сытин А.К., Рязанова Л.В., Сластунов Д.Д. А.Г. Еленевский и гипотеза эволюции однолетних растений // Систематические и флористические исследования Северной Евразии: Материалы международной конференции к 90-летию со дня рождения профессора А.Г. Еленевского (5–8 декабря 2018 г.). М., 2018. Т. 3. С. 47–50. [Sytyin A.K., Ryazanova L.V., Slastunov D.D. A.G. Elenevskiy and the evolutionary hypothesis of annual plants. *Sistematicheskie i floristicheskie issledovaniya Severnoy Evrazii*. Moscow, 2018. Vol. 3. Pp. 47–50.]



7. Сытин А.К., Сластунов Д.Д. О восстановлении названия *Astragalus psiloglottis* (Fabaceae) // Новости систематики высших растений. 2018. Т. 49. С. 99–105. [Sytin A.K., Slastunov D.D. On the restoration of the name *Astragalus psiloglottis* (Fabaceae). *Novosti sistematiki vysshikh rasteniy*. 2018. Vol. 49. Pp. 99–105.]

8. Azani N., Bruneau A., Wojciechowski M.F., Zarre Sh. Molecular phylogenetics of annual *Astragalus* (Fabaceae) and its systematic implications. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 2017. Vol. 184. Issue 3. Pp. 347–365.

Статья поступила в редакцию 21.10.2018

The article was received on 21.10.2018

**Сластунов Дмитрий Данилович** – программист, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет

**Slastunov Dmitry D.** – programmer, St. Petersburg State Forestry University

E-mail: slastunov@gmail.com

**Сытин Андрей Кириллович** – доктор биологических наук; ведущий научный сотрудник отдела «Гербарий высших растений», Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН

**Sytin Andrei K.** – Dr. Biol. Hab.; leading researcher at the Department “Herbarium of Higher Plants”, Komarov Botanical Institute of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

E-mail: andrey.sytin.bin@gmail.com

**Рязанова Лидия Васильевна** – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник отдела «Гербарий высших растений», Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН

**Ryazanova Lidiya V.** – PhD in Biology; senior researcher at the Department “Herbarium of Higher Plants”, Komarov Botanical Institute of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

E-mail: lrjazanova@yandex.ru