

## Кластерный анализ микроэлементного состава растений как концептуальная основа решения некоторых задач хемосистематики

### Cluster analysis of plant microelement composition as a conceptual basis solving of some chemotaxonomy problems

Круглов Д. С.

Kruglov D. S.

ФГБОУ ВО Новосибирский государственный медицинский университет, г. Новосибирск, Россия. E-mail: kruglov\_ds@mail.ru  
Novosibirsk state medical university, Novosibirsk, Russia

**Реферат.** При решении задач хемосистематики используются видоспецифичные химические соединения в качестве маркерных. Вместе с тем и микроэлементный статус растения может быть видоспецифичным, т.к. обусловлен во многом геномом растения. Целью настоящей работы являлась оценка эффективности метода кластерного анализа микроэлементного состава для целей хемосистематики. Объектами исследования служили надземные генеративные побеги растений подсемейства *Boraginoideae*, собранные в фазе цветения в разные годы и в разных местах произрастания. Анализ микроэлементного состава позволил распределить исследуемые виды семейства *Boraginaceae* на две трибы, что коррелирует с принятым в системе APG разделением указанных видов по трибам *Boraginaeae* и *Lithospermeae*. На анализе растений трибы *Boragineae* было показано, что используемый метод анализа инвариантен к изменчивости состава отдельного вида. Анализ видов рода *Pulmonaria* подтвердил инвариантность метода по отношению к индивидуальной изменчивости вида и показывает, что виды, в принципе, можно объединить в три кластера: 1 – *P. mollis*, 2 – *P. angustifolia*, 3 – *P. officinalis*, *P. rubra* и *P. obscura*. Разработанный концептуальный подход к использованию микроэлементного статуса растения для решений задач хемосистематики позволяет создать методику анализа, обладающую с одной стороны устойчивостью к индивидуальной изменчивости микроэлементного статуса отдельного вида, а с другой достаточной степенью информативности, зависящей от филогенетического положения вида.

**Ключевые слова.** Бурачниковые, кластерный анализ, концептуальный подход, медуница, микроэлементный статус, хемосистематика.

**Summary.** The species-specific chemical compounds are used solving problems of chemotaxonomy as markers. At the same time, the trace element status of a plant can also be species-specific because it determined by the plant genome. The aim of this work was to evaluate the effectiveness of cluster analysis method of microelement composition to the purposes of chemotaxonomy. The studied objects were above-ground generative shoots of the subfamily *Boraginoideae* plants. They were collected in the flowering phase in different years and in different places of growth. The studied species of family *Boraginaceae* were distributed into two tribes by made method of analysis, which is correlated with the division of these species into the tribes *Boraginaeae* and *Lithospermeae* accepted in the APG system. In the analysis of the tribe *Boragineae* plants, it was shown that the analysis method used is invariant to the variability of individual species composition. Analysis of genus *Pulmonaria* species confirmed the invariance of the method with respect to the individual variability and shows that species of this genus can be combined into three clusters: 1 – *P. mollis*, 2 – *P. angustifolia*, 3 – *P. officinalis*, *P. rubra* and *P. obscura*. The made the conceptual approach using of the microelement status by solving problems in chemotaxonomy makes it possible to create an analysis technique that, on the one hand, is resistant to individual variability of the microelement status of a particular species, and on the other hand, has a sufficient degree of information content depending on the phylogenetic position of the species

**Key words.** *Boraginaceae*, chemotaxonomy, cluster analysis, conceptual approach, *Pulmonaria*, trace element status.

Общепринятым при решении задач хемосистематики является использование маркерных химических соединений, являющихся видоспецифичными, в качестве которых зачастую используют такие продукты «вторичного», точнее говоря видоспецифичного метаболизма – фенольные соединения, изопrenoиды, алкалоиды. Компонентный состав упомянутых выше биологически-активных соедине-

ний является существенно более видоспецифичным, по сравнению с продуктами первичного (или основного) метаболизма, как правило, общими для всех растительных организмов.

Вместе с тем для биосинтеза химических соединений в растительном организме требуется определенный набор микроэлементов. Учитывая бесспорную связь микроэлементов с синтезируемым составом веществ вторичного метаболизма необходимо обратить внимание на тот факт, что поглощение элементов из почвы происходит по симпласту активным образом через белки-переносчики, встраиваемые в плазмалемму клеток корневых волосков и только 5 % элементов (находящихся в почве в растворимой форме) способно проникнуть внутрь растения в результате простой диффузии по апопласту. Таким образом микроэлементы в растение могут попасть эндогенно из почвы, только путем активного переноса через плазмолемму клеток с помощью белков, состав которых зависит от генома растения. Следовательно, состав микроэлементов в растении, поступающих эндогенно, видоспецифичен и генетически закреплен, и в этой связи можно говорить о микроэлементном гомеостазе (Круглов, 2018).

В настоящий момент современными методами анализа в растениях определяется концентрация более чем 60-ти химических элементов. Для анализа таких данных, в отсутствии полного представления о физиологических процессах биосинтеза веществ в растительном организме, наиболее эффективно использование методологии «черного ящика». В этом случае растительный организм представляется неким «черным ящиком», в котором неким неизвестным способом происходит обработка входных данных. В наших случаях мы не знаем, как и почему растения усваивают элементы и нам известны только его входные (например, различные виды растений) и выходные данные – в данном случае совокупность микроэлементов, содержащихся в каждом виде, которую мы можем измерить. Для анализа подобных систем применяются методы многофакторной статистики, основанной на непараметрической статистики, из которых чаще всего применяется кластерный анализ. Такой подход был впервые применен для анализа 55-ти видов растений семейства Boraginaceae (Круглов, Овчинникова, 2012) и установлено, что наибольшее влияние на микроэлементный спектр растения оказывают эволюционный возраст и филогенетические связи. В этой связи представляет интерес оценка пределов возможности данного концептуального подхода в решении задач хемосистематики.

Объектами исследования служили (табл. 1) надземные генеративные побеги растений подсемейства *Boraginoideae* (*Pulmonaria mollis* Wulf. ex Horn., *Pulmonaria obscura* Dum., *Nonea rossica* Stev., *Onosma arenaria* Waldst. et Kit., *Onosma simplissima* L., *Echium vulgare* L., *Brunnera sibirica* Stev. и *Lithospermum officinale* L.), собранные в фазе цветения.

Таблица 1

## Объекты исследования

Растение	№ обр	Год сбора	Характеристика места сбора	Координаты	
				широта	долгота
<i>Pulmonaria mollis</i>	1.	2006	Новосибирская область, Колыванский район, сосновый бор	55°12'	82°42'
<i>P. mollis</i>	2.	2010	там же	–“–	–“–
<i>P. mollis</i>	3.	2012	там же	–“–	–“–
<i>P. mollis</i>	4.	2018	там же	–“–	–“–
<i>P. mollis</i>	5.	2022	там же	–“–	–“–
<i>P. mollis</i>	7.	2007	Новосибирская область, Тогучинский район, березовый окол	55°00'	83°42'
<i>P. mollis</i>	8.	2008	Томская область, Томский район, сосновый бор	56°42'	84°39'
<i>P. mollis</i>	9.	2019	Красноярский край, Иланский район, сосновый бор	56°14'	96°06'
<i>P. mollis</i>	10.	2008	Алтайский край, Тогульский район, смешанный лес	53°34'	86°08'
<i>P. mollis</i>	11.	2008	Кемеровская область, Осинниковский район, смешанный лес	53°22'	87°08'
<i>Nonea rossica</i>	12.	2007	Новосибирская область, Тогучинский район, березовый окол	55°00'	83°42'

Продолжение табл. 1

Растение	№ обр	Год сбора	Характеристика места сбора	Координаты	
				широта	долгота
<i>N. rossica</i>	13.	2009	Алтайский край, Тогульский район, смешанный лес	53°34′	86°08′
<i>N. rossica</i>	14.	2022	Новосибирская область, Колыванский район, остепненный луг	55°31′	82°57′
<i>Onosma simplissima</i>	15.	2010	Новосибирская область, Тогучинский район, каменистый склон сопки	55°08′	83°88′
<i>O. simplissima</i>	16.	2023	Новосибирская область, Искитимский район, каменистый склон реки	54°34′	83°21′
<i>O. arenaria</i>	17.	2010	Республика Сербия, Борский округ, песчаная степь	44°30′	22°41′
<i>Lithospermum officinale</i>	18.	2009	Алтайский край, Топчихинский район, степь	52°39′	83°12′
<i>Echium vulgare</i>	19.	2017	Новосибирская область, Тогучинский район, остепненный луг	54°58′	83°44′
<i>Brunnera sibirica</i>	20.	2008	Томская область, Томский район, смешанный лес	56°20′	84°55′
<i>B. sibirica</i>	21.	2012	г. Новосибирск, Советский район, дачный участок	54°91′	83°08′
<i>Pulmonaria obscura</i>	22.	2005	Ярославская область, Тутаевский район, смешанный лес	57°88′	39°47′

Также использовались для анализа гербарные образцы растений из ЦСБС: *Pulmonaria officinalis* L., *P. rubra* Schott, *P. angustifolia* L., *Arnebia guttata* Bunge, *A. coerulea* Schipcz., *Symphytum officinale* L., *S. ibericum* Stev., *S. asperum* Lepech., *Anchusa italica* Retz.

Количественное определение содержания микроэлементов проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре «ELAN мод. 9000, DRCII, DRC-e» (Perkin Elmer Inc., США). Для построения иерархического дерева использовали кластерный анализ с нормированием, данный по рядам и использование пакета прикладных программ «STATISTICA 10.0».

В результате было определено содержание 60-ти элементов – Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U.

По полученным данным было построено иерархическое дерево (рис. 1), анализ которого показывает, что исследованные виды по микроэлементному статусу четко разделились на две трибы, что

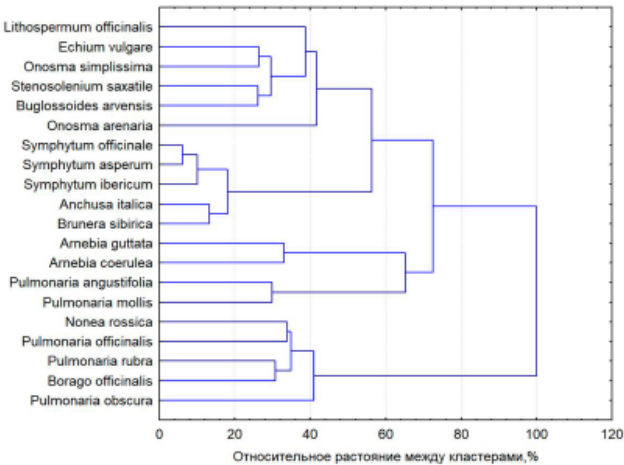


Рис. 1. Иерархическое дерево видов подсемейства *Boraginoideae*.

коррелирует с принятым в системе APG разделение указанных видов по трибам *Boraginaeae* и *Lithospermeae* (Chacon et al., 2016).

Для оценки информативности разрабатываемого подхода был проведен анализ микроэлементного состава растений трибы *Boragineae*, причем для *P. mollis* были взяты образцы, собранные в разные годы и в разных местах ареала. Построенное иерархическое дерево приведено на рис. 2.

Анализ дерева на рис. 2 свидетельствует о малой чувствительности метода к индивидуальной изменчивости содержания микроэлементов у отдельного вида, т. е. используемый метод анализа инвариантен к изменчивости состава отдельного вида и в большей степени зависит от филогенетического родства.

На следующем этапе анализ микроэлементного состава был проведен для видов рода *Pulmonaria*. Построенное иерархическое дерево приведено на рис. 3. Анализ дерева на рис. 3 подтверждает инвариантность метода по отношению к индивидуальной изменчивости вида и показывает, что виды, в принципе, можно объединить в три кластера:

- 1 – *P. mollis*;
- 2 – *P. angustifolia*;
- 3 – *P. officinalis*, *P. rubra* и *P. obscura*.

Такое деление соответствует различиям в морфологическом строении данных видов.

Таким образом, предлагаемый концептуальный подход к использованию микроэлементного статуса растения для решений задач хемосистематики позволяет создать методику анализа, обладающую, с одной стороны, устойчивостью к индивидуальной изменчивости микроэлементного статуса отдельного вида, а, с другой, достаточной степенью информативности, зависящей от филогенетического положения вида.

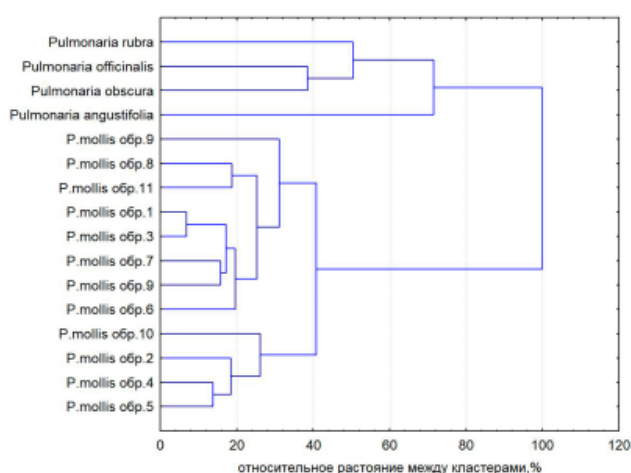


Рис. 2. Иерархическое дерево видов трибы *Boragineae*.

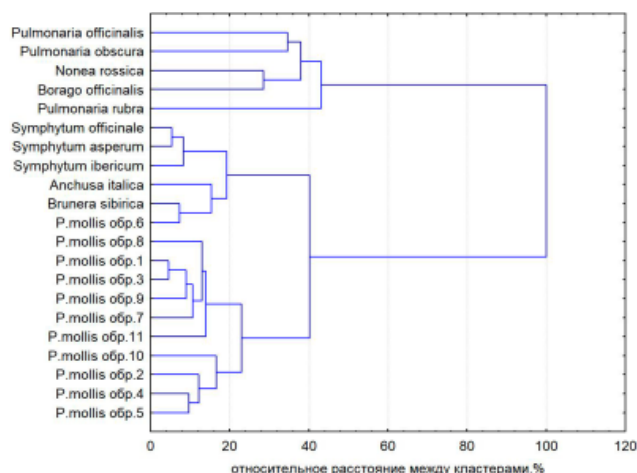


Рис. 3. Иерархическое дерево видов рода *Pulmonaria*.

## ЛИТЕРАТУРА

**Круглов Д. С.** Прогностическая применимость микро элементного профиля растений для задач систематики // Ботаника в современном мире. Труды Русского ботанического общества Т. 1: Систематика высших растений. Флористика и география растений. Охрана растительного мира. Палеоботаника. Ботаническое образование. – Махачкала: АЛЕФ, 2018. – С. 58–60.

**Круглов Д. С., Овчинникова С. В.** Элементный состав растений семейства Boraginaceae // Растительный мир Азиатской России, 2012. – № 1(9). – С. 77–95.

**Chacon Ju., Luebert F., Hilger H. H., Ovchinnikova S., Selvi F., Cecchi L., Guilliams C.M., Hasenstab-Lehman K., Sutory K., Simpson M.G., Weigend M.** The borage family (Boraginaceae s. str.): A revised infrafamilial classification based on new phylogenetic evidence, with emphasis on the placement of some enigmatic genera // TAXON, 2016. – Vol. 65 (3). – P. 523–546. DOI: 10.12705/653.6