

Использование экспертных систем для идентификации классов растительности на территории Южной Сибири

Application of expert systems for identification of vegetation classes in South Siberia

Синьковский Е. К.¹, Чупина И. С.^{1,2}, Королюк А. Ю.¹, Дулепова Н. А.¹

Sinkovskiy E. K.¹, Chupina I. S.^{1,2}, Korolyuk A. Yu.¹, Dulepova N. A.¹

¹ Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: sinkkos95@gmail.com

¹ Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия. E-mail: irachupina@mail.ru

² Altai State University, Barnaul, Russia

Реферат. В связи с увеличением объемов первичных фактических данных, геоботаники столкнулись с проблемой обработки огромных массивов геоботанического материала. По мере развития информационных методов у специалистов появляется больше инструментов для оптимизации своей деятельности, одним из которых являются экспертные системы, позволяющие успешно решать проблему классификации. Экспертная система разработана в 2020 г. европейскими исследователями для определения типов местообитаний в системе EUNIS. Целью нашей работы является создание на основе предложенного европейскими специалистами функционала собственной экспертной системы, позволяющей определять принадлежность геоботанических описаний к классам растительности флористической классификации. Проведена классификация около 10000 описаний высокогорной растительности Алтае-Саянской горной области, растительности Новосибирской области и Алтайского края, а также степной и псаммофитной растительности Забайкалья методом Браун-Бланке с использованием экспертной системы. Написанный нами скрипт показал свою эффективность, позволяя правильно определять синтаксонимическую принадлежность около 90 % описаний. Около 10 % данных либо классифицированы неверно, либо не отнесены системой ни к одной из рассматриваемых высших единиц, что связано с неопределенностью диагностических видов в рамках слабоизученных классов, а также с неочевидностью отнесения к тому или иному классу переходных сообществ. Для иллюстрации работы экспертной системы выполнено картирование ряда классов, показывающее их географическое распространение и широтно-зональную приуроченность, а также связь типов растительных сообществ с экологическими факторами.

Ключевые слова. Высокогорная растительность, метод Браун-Бланке, псаммофитная растительность, синтаксономия, степная растительность.

Summary. Due to the increase in the volume of primary factual data geobotanists have faced the problem of processing huge selection of geobotanical material. With the development of information methods, specialists have more tools to optimize their activities, one of which are expert systems that can successfully solve the problem of classification. An expert system was developed in 2020 by European researchers to identify habitat types in the EUNIS system. The aim of our work is to create our own expert system, based on the functionality proposed by European specialists, which allows to determine whether geobotanical descriptions belong to vegetation classes of the floristic classification. Classification of about 10000 descriptions of high-mountainous vegetation of the Altai-Sayan mountain region, vegetation of Novosibirsk region and Altai region as well as steppe and psammophytic vegetation of Transbaikalia by the Braun-Blanquet method using the expert system has been performed. The script written by us has shown its efficiency, allowing us to determine correctly the syntaxonomic affiliation of about 90 % of the descriptions. About 10 % of the data are either classified incorrectly or are not assigned by the system to any of the higher units under consideration, which is due to the uncertainty of diagnostic species within poorly studied classes, as well as to the non-obviousness of assignment to one or another class of transitional communities. To demonstrate the work of the expert system, a number of classes were mapped, showing their geographic distribution and latitudinal-zonal confinement, as well as the relationship between plant community types and ecological factors.

Key words. Braun-Blanquet method, high-mountain vegetation, psammophytic vegetation, steppe vegetation, syntaxonomy.

Введение. По мере развития информационно-вычислительных технологий и увеличения объемов первичных фактических данных в виде описаний растительных сообществ все более актуальной становится задача обработки больших массивов данных. Ее корректное решение позволяет подойти к формализованной классификации растительности для типов растительности и крупных регионов. С развитием современных информационных методов у геоботаников появляется больше различных инструментов для оптимизации своей деятельности, одним из них являются экспертные системы, позволяющие проводить классификацию растительности, основываясь на формальных критериях оценки состава и структуры сообществ. Первая такая система была создана в ходе подготовки чек-листа растительности Европы (Mucina et al., 2016), она позволяет определять принадлежность описания к классу флористической классификации. Аналогичные иерархические системы могут применяться для синтаксонов ранга порядка-союза-ассоциации (Willner et al., 2019). Экспертная система разработана европейскими исследователями для определения типов местообитаний в системе EUNIS, она была апробирована на массиве объемом более миллиона геоботанических описаний (Chytrý et al., 2020). В целом, недолгий опыт разработки и применения экспертных систем показал их эффективность при классификации геоботанических данных.

Цель нашей работы – на основе созданного европейскими исследователями функционала разработать экспертную систему, позволяющую определять принадлежность геоботанических описаний к классам растительности флористической классификации.

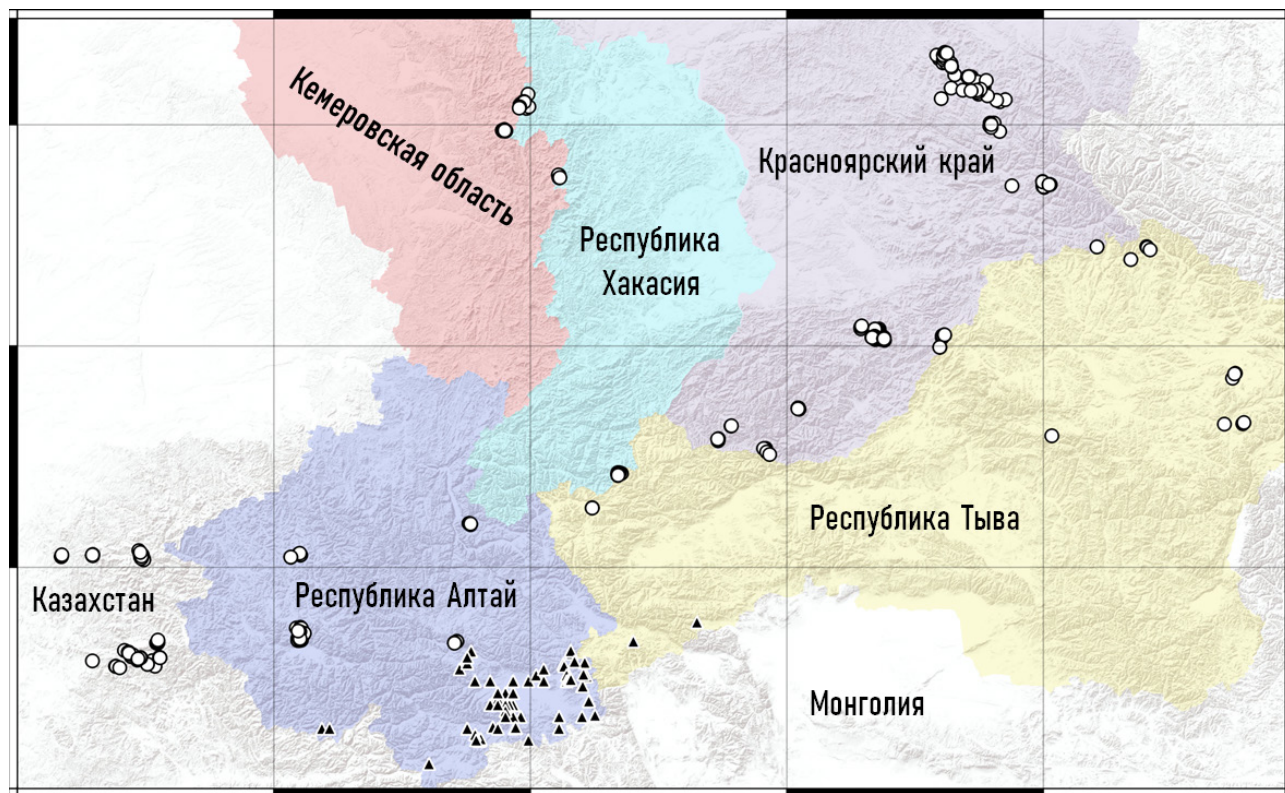
Материалы и методы. В качестве данных для построения и тестирования экспертной системы мы использовали 9926 геоботанических описаний, представляющих различные типы растительности на территории Южной Сибири. Хранение и первичная обработка данных проводилась в ботанической интегрированной информационной системе IBIS 7.2 (Зверев, 2007). Тестирование производилось на трех объектах: высокогорной растительности Алтае-Саянской горной области (3186 описаний), растительности Новосибирской области и Алтайского края (4662 описаний), степной и псаммофитной растительности Забайкалья (2078 описаний).

Запуск экспертной системы производился в программном пакете JUICE 7.1 (Tichy, 2002). Структура системы состоит из трех последовательных секций или блоков, работа с каждым из которых возможна как в текстовом редакторе, так и с использованием встроенного инструментария программы JUICE версии 7.0 и выше. Первый блок представляет собой список видов-агрегатов, которые по тем или иным причинам целесообразно объединить. Второй блок состоит из групп видов, разбитых на две категории, каждая из которых отражает специфику объекта исследования. К первой категории относятся функциональные группы, которые объединяют таксоны со схожими чертами (жизненная форма, морфологические или экологические особенности и т. д.). Во вторую категорию входят дискриминативные группы, которые представляют собой список диагностических видов для типов сообществ. В нашем случае мы использовали диагностические виды классов флористической классификации растительности. В третьем блоке исследователь составляет логическую запись, используя логические операторы, а также ряд функций. Экспертная система функционирует в иерархическом формате, имея 8 уровней приоритета: 8 – высший уровень, 1 – низший. Когда скрипт запущен, машина обрабатывает в первую очередь функцию с наибольшим приоритетом. Если описание соответствует условиям функции, то ему назначается соответствующее название, указанное в функции. Если условие не выполняется, то описание остается неклассифицированным и к нему применяются функции с меньшим приоритетом и т.д.

Результаты и осуждение. Задачей созданной нами экспертной системы является определение принадлежности геоботанических описаний к классам флористической классификации растительности. Она была апробирована на массиве 9926 описаний. Написанный нами скрипт позволяет правильно определять синтаксономическую принадлежность около 90 % данных. Корректность определения оценивалась экспертно, а также с использованием опубликованных данных, в которых указана принадлежность описаний к определенным классам. Около 10 % описаний либо классифицированы неверно, либо вовсе не отнесены системой ни к одной из высших единиц. Это происходит в случаях, если для рассматриваемого класса в недостаточной мере определена диагностическая комбинация видов, примером чего могут служить каменистые тундры класса *Rhodiotea quadrifidae* Hilbig 2000. Также данные случаи наблюдаются при континуальном переходе между классами, который проявляется в существовании переходных типов сообществ. Например, эта проблема ярко проявляется в плавном

переходе между овсяницевыми альпийскими лугами класса *Juncetea trifidi* Hadač in Klika et Hadač 1944 и высокогорными тундрами класса *Carici rupestris–Kobresietea bellardii* Ohba 1974, а также в остепненных лугах, занимающих переходное положение между классами *Festuco–Brometea* Br.-Bl. et Tx. ex Soó 1947 и *Molinio–Arrhenatheretea* Tx. 1937, а также между песчаными степями класса *Cleistogenetea squarrosae* Mirkin et al. ex Korotkov et al. 1991 и псаммофитными сообществами класса *Brometea korotkiji* Hilbig et Korolyuk 2000.

Анализ массива данных, представляющих высокогорную растительность Алтае-Саянской горной области, позволил отнести описания к 7 классам: *Mulgedio–Aconitetea* Hadač et Klika in Klika et Hadač 1944 (редколесья, криволесья, травянистые кустарниковые сообщества, лесные и субальпийские луга), *Cleistogenetea squarrosae* Mirkin et al. 1986 (криофитные степи), *Loiseleurio–Vaccinietea* Egger 1952 (кустарниковые тундры), *Juncetea trifidi* (ацидофильные луга), *Carici rupestris–Kobresietea bellardii* (кобрезиевники, дриадовые и овсяницевые тундры), *Salicetea herbaceae* Br.-Bl. 1948 (нивальные луга), *Rhodioletea quadrifidae* (петрофитные сообщества). Экспертная оценка результатов позволяет говорить об эффективности разработанной экспертной системы. Сложности в классификации экотонных сообществ, на наш взгляд, могут быть преодолены двумя путями: более тщательной разработкой диагностических комбинаций классов и ранжированием входящих в них видов по их диагностической значимости. Основываясь на анализе высокогорной растительности, мы можем говорить о возможности использования экспертных систем для экспресс-оценки синтаксономической принадлежности больших массивов геоботанических данных. Это может быть полезно, в частности, для картирования распространения синтаксонов высокого ранга и выявления связей типов растительных сообществ с экологическими факторами, в том числе биоклиматическими параметрами. Иллюстрацией этого может служить анализ распределения классов *Mulgedio–Aconitetea* и *Cleistogenetea squarrosae* (рис. 1), показывающий четкое разграничение сообществ класса *Mulgedio–Aconitetea*, характерных для северных, гумидных местообитаний Алтае-Саянской горной страны, и криофитных степей класса *Cleistogenetea squarrosae*, которые приурочены к южным, наиболее аридным территориям.



○ 1 ▲ 2

Рис. 1. Картограмма местонахождений растительных сообществ на территории Алтае-Саянской горной области: 1 – класс *Mulgedio–Aconitetea*; 2 – класс *Cleistogenetea squarrosae*.

Массив описаний с территории юга Западно-Сибирской равнины был аффилирован к 11 классам: *Phragmito–Magnocaricetea* Klika in Klika et Novák 1941 (прибрежно-водная растительность), *Therosalicornietea* Tx. in Tx. et Oberd. 1958 (сообщества однолетних суккулентных галофитов), *Kalidietea foliati* Mirkin et. al. ex Rukhlenko 2012 (сообщества гипергалофитных кустарничков и полукустарничков), *Festuco–Puccinellietea* Soó ex Vicherek 1973 (внутриконтинентальная галофитная растительность с доминированием многолетних трав), *Molinio–Arrhenatheretea* (луга), *Festuco–Brometea* (степи), *Carici supinae–Betuletea pendulae* Laschinsky et Makunina 2021 (мелколиственные ксерофитнотравяные леса степной зоны), *Brachypodio pinnati–Betuletea pendulae* Ermakov et al. 1991 (светлохвойные и мелколиственные мезофитнотравяные леса), *Koelerio glaucae–Pinetea sylvestris* Ermakov 2020 (сосновые ксерофитнотравяные леса на песках), *Vaccinio–Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 (таежные леса) и *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et Tx. ex Westhoff et al. 1946 (древесные и кустарниковые сообщества евтрофных болот). Разработанная нами экспертная система показывает хороший результат для классов заболоченных, псаммофитных сосновых и таежных лесов, прибрежно-водной и галофитной растительности, правильно определяя синтаксономическую принадлежность практически всех описаний. Эти типы сообществ характеризуется специфичным набором видов, зачастую встречающихся только в одном классе, что позволяет системе безошибочно их распознавать. Широко представленные на территории юга Западной Сибири сообщества классов *Molinio–Arrhenatheretea* и *Festuco–Brometea* распознаются хуже, обычно в пределах 75–85 %. Это связано со схожестью видового состава и диагностических видов двух порядков, представляющих луговые степи и остепненные луга (*Brachypodietalia pinnati* Korneck 1974 и *Galietaalia veri* Mirkin et Naumova 1986). Аналогичная проблема наблюдается при классификации описаний мелколиственных травяных лесов – классов *Carici supinae–Betuletea pendulae* и *Brachypodio pinnati–Betuletea pendulae*. Картирование классов, определенных с помощью экспертной системы, позволяет оценить их географическое распространение и широтно-зональную приуроченность. Так, сообщества класса *Koelerio glaucae–Pinetea sylvestris* встречаются только в ленточных борях степи и лесостепи, где Бурлинская лента является северной границей их ареала. Сообщества класса *Vaccinio–Piceetea*, напротив, крайне редко проникают в степную зону, достигая фитоценотического разнообразия в лесной и лесостепной области (рис. 2).

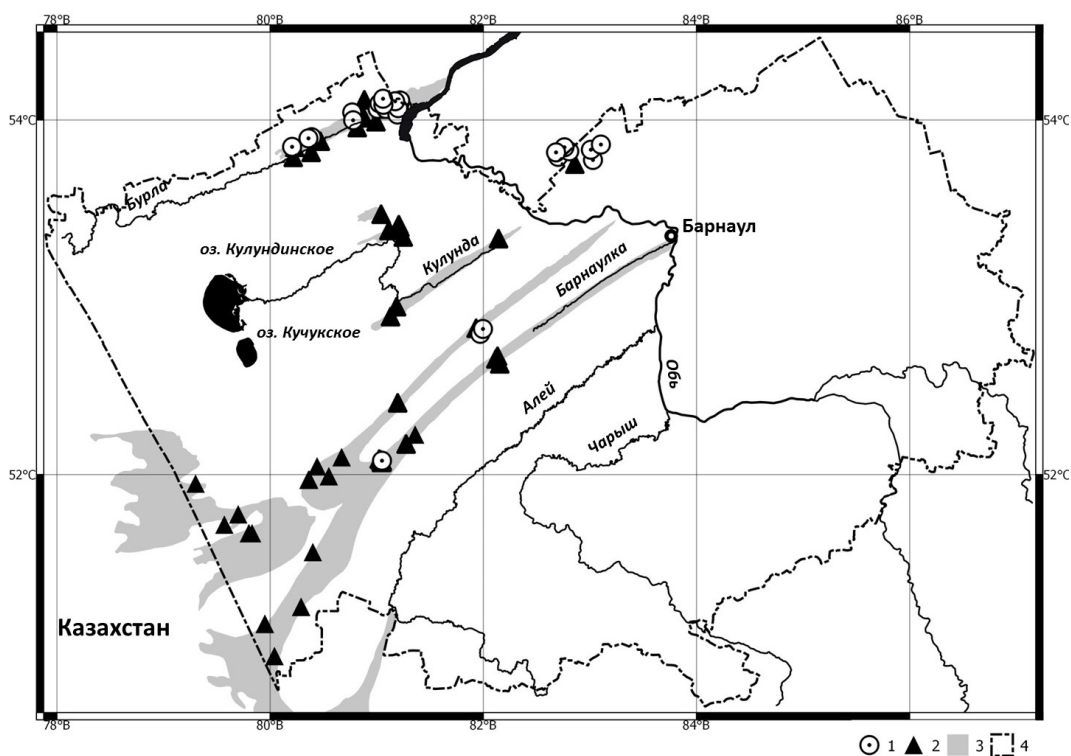


Рис. 2. Картограмма местонахождений растительных сообществ на территории Алтайского края: 1 – класс *Vaccinio–Piceetea*; 2 – класс *Koelerio glaucae–Pinetea sylvestris*; 3 – ленточные боры; 4 – административная граница.

Описания степной и псаммофитной растительности Забайкалья были отнесены к двум классам – *Cleistogenetea squarrosae* и *Brometea korotkiji* соответственно. Экспертная система практически правильно определяет синтаксономическую принадлежность за некоторым исключением. Так, сообщества *Artemisio ledebourianaе–Caricetum argunensis* Dulepova et Korolyuk 2013 класса *Brometea korotkiji* относит неверно. Это связано с тем, что ценозы представляют более увлажненные варианты псаммофитной растительности и характеризуются доминированием растений с двойственной экологией – предпочитающих каменистые местообитания и открытые пески. Эти растения можно обозначить как псаммо-петрофиты, к этой группе относятся *Carex argunensis* Turcz. ex Trevir., *Pulsatilla turczaninovii* Krylov et Serg. и *Silene jenseensis* Willd. Сообщества *Cleistogenetea squarrosae–Festucetum dahuricae* Dulepova et Korolyuk 2013 система относит сразу к двум классам растительности. Это вполне закономерно, так как синтаксон занимает промежуточное положение, характеризуется высокой активностью растений, индизирующих заключительные стадии закрепления песков (виды класса *Cleistogenetea squarrosae*), а основным доминантом выступает *Festuca dahurica* (St.-Yves) V. I. Krecz. et Bobrov, а содоминантами – виды класса *Brometea korotkiji*.

Заключение. Применение экспертных систем для определения принадлежности геоботанических описаний к классам флористической классификации показало свою эффективность. К плюсам данной технологии можно отнести ее гибкость, настраиваемость и масштабируемость, автономность работы, легкость написания скриптов и доступность программного обеспечения. Использование экспертных систем позволяет оптимизировать некоторые этапы работ, облегчая анализ больших массивов данных. Следует отметить, что для разработки экспертных систем требуется глубокое понимание объекта исследования, задач и критериев классификации. В то же время ее результаты могут быть проверены как самим автором, так и сторонними экспертами, что позволяет формально оценить эффективность разработанной системы. Возникающие сложности обычно связаны как с ее континуальным характером растительности, так и с недостаточной разработанностью синтаксономических систем для некоторых типов сообществ высокого ранга. Стоит отметить, что для повышения эффективности классификации целесообразно использовать уже опубликованные описания, редактируя список видов в дискриминантных группах и добиваясь корректного распознавания всех описаний.

В целом экспертные системы могут быть использованы для решения широкого круга задач в рамках изучения растительности. Также она интересна в плане обучения начинающих исследователей, так как показывает формализованную логику классификационных построений на примере авторских данных или сторонних примеров. Учитывая возможность создания иерархических экспертных систем, данная технология может успешно применяться для формализованного анализа больших массивов геоботанических данных, что, как показывает современный международный опыт, становится все более актуальной задачей.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА–А21–121011100007–6 Центрального сибирского ботанического сада СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Зверев А. А.** Информационные технологии в исследованиях растительного покрова: учебное пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 301 с.
- Chytrý M., Tichý L., Hennekens S., Knollová I., Janssen J., Rodwell J. et al.** EUNIS Habitat Classification: Expert system, characteristic species combinations and distribution maps of European habitats // Applied Vegetation Science, 2020. – Vol. 23. – P. 648–675. DOI: 10.1111/avsc.12519
- Mucina L., Bültmann H., Diersen K., Theurillat J.-P., Raus T., Čarni A., et al.** Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities // Applied Vegetation Science, 2016. – Vol. 19(1). – P. 3–264. DOI: 10.1111/avsc.12257
- Tichý L.** JUICE, software for vegetation classification // J. Veg. Sci., 2002. – Vol. 13. – P. 451–453. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2002.tb02069.x
- Willner W., Roleček J., Korolyuk A., Dengler J., Chytrý M., Janišová M., et al.** Formalized classification of semi-dry grasslands in central and eastern Europe // Preslia, 2019. – Vol. 91. – P. 25–49. DOI: 10.23855/preslia.2019.025