

УДК 57.08 004.931

DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-105-112

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЗЕРЕН

Ю. Б. Камалова, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия  
Г. В. Ломаев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,  
Ижевск, Россия

*В статье рассмотрены информационные признаки для компьютерной классификации пыльцевых зерен, а также проанализировано их морфологическое строение с рассмотрением геометрических признаков на разных уровнях. В качестве признаков для распознавания выявлены размеры (экваториальный диаметр и полярный радиус и др.), очертания, скульптура, апертура, текстура, полярность пыльцевых зерен. Приведен пример классификации пыльцевых зерен. Были найдены интервалы и количество растений, попадающих в данные интервалы по признакам, – экваториальному диаметру и полярному радиусу. Для экваториального диаметра было выявлено, что максимальное число растений (25 шт.) лежит в диапазоне от 40 до 50 мкм и т. д. По выявленным данным была построена таблица диапазонов экваториального диаметра и количества растений, попадающих в данный диапазон, и диаграмма. Было выявлено, что в диапазон значений полярного радиуса от 0 до 10 мкм не попало ни одного растения, в диапазон от 10 до 20 мкм попало 6 растений, от 20 до 30 мкм – 28 растений и т. д. По выявленным данным была построена таблица диапазонов полярного радиуса и количества растений, попадающих в данный диапазон, и диаграмма.*

**Ключевые слова:** компьютерный пыльцевой анализ, пыльца растений, распознавание изображений, ботаническое происхождение меда, признаки пыльцевых зерен, компьютерная классификация пыльцевых зерен.

Автоматизированный компьютерный пыльцевой анализ актуален во многих областях науки и производства – в контроле ботанического и географического происхождения меда, в фармацевтической промышленности, в экологии, в палинологии и др.

**Цель работы** – анализ морфометрических характеристик пыльцевых зерен с точки зрения их использования в качестве информативных параметров при автоматизированном компьютерном распознавании.

**Задачи:**

1. Проанализировать морфологическое строение пыльцевых зерен с детальным рассмотрением геометрических признаков на разных уровнях.

2. Выделить информативные признаки пыльцевых зерен, пригодные для распознавания.

Пыльцевой анализ особенно важен при производстве монофлерного меда. Существующий ГОСТ 31766–2012 «Меды монофлорные. Технические условия» предлагает оценивать мед по электропроводности и цвету. Данная методика может надежно ис-

пользоваться для классификации всего лишь трех видов медов – липового, гречишного и подсолнечного. Более детального определения данные классификационные признаки не позволяют осуществить.

Помимо геометрической формы можно использовать цветовые оттенки пыльцы-обножки, приносимой пчелой в улей. Хотя классификация по цвету и дает положительные результаты [1, 2], однако ряд артефактов усложняют и уменьшают достоверность классификации (влажность пыльцы-обножки, плотность, состояние поверхности и др.). Опыт многих исследователей демонстрирует, что наиболее эффективным направлением для решения задачи классификации является компьютерный пыльцевой анализ. Этим обосновывается актуальность компьютерного пыльцевого анализа.

**Размеры и очертания пыльцевых зерен как признак для распознавания**

Классификационными признаками при использовании оптического микроскопа являются параметры двухмерного изображения пыльцы. Как видим из книги «Все о меде» [3], самые простые классификацион-

ные признаки – это очертания (контуры) и размеры пыльчинок.

Несмотря на то, что споры и особенно пыльцевые зерна некоторых растений имеют достаточно сложную форму, которую невозможно охарактеризовать одним термином, вследствие чего приходится описывать шире, большинство покрытосеменных (особенно двудольных) растений обладает радиально-симметричными пыльцевыми зернами, в общем представляющими собой тела, которые геометрически могут быть охарактеризованы как эллипсоиды вращения, шары или сфероиды вращения. Размер зерна – хороший признак, позволяющий

легко проводить компьютеризированную классификацию, но недостаточный. Поэтому чаще всего используют геометрические особенности формы пыльцевых зерен (квадратность, многогранность и др.).

*Экватор* – очертание плоскости, перпендикулярной полярной оси, отстоящей на равном расстоянии от полюсов и делящей зерно на два полушария (проксимальное и дистальное).

*Экваториальный диаметр*, или экваториальная ось, перпендикулярен полярной оси. В зависимости от формы и строения пыльцевых зерен полярная ось иногда бывает короче экваториального диаметра (рис. 1) [4].

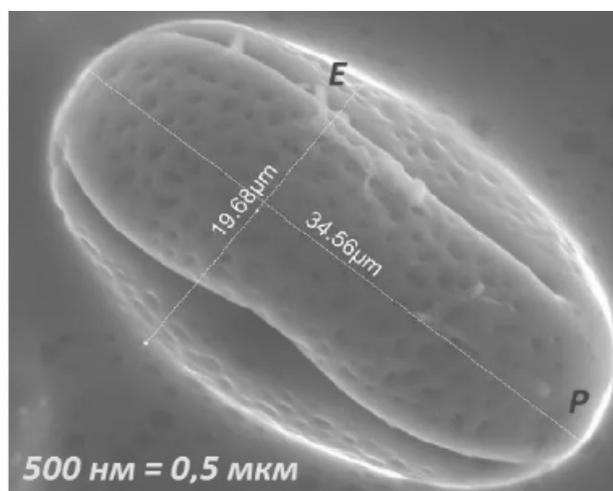


Рис. 1. Тетраэдрическая тетрада (сверху) и перекрестная тетрада (снизу), полярный и экваториальный радиус пыльцевого зерна

При использовании данных пыльцевых зерен из книги [5] была систематизирована информация о полярном радиусе и экваториальном диаметре пыльцевых зерен 88 растений разных семейств. Все значения были разделены на 9 диапазонов (с шагом 10 мкм: 0–9 мкм, 10–19 мкм, 20–29 мкм, 30–39 мкм) для полярного радиуса и экваториального диаметра всех приведенных в сборнике [6] растений соответственно. Для выявления

попадания количества растений в разные диапазоны были посчитаны средние значения разброса значений каждого растения.

Было выявлено, что в диапазон значений полярного радиуса от 0 до 10 мкм не попало ни одного растения, в диапазон от 10 до 20 мкм попало 6 растений, от 20 до 30 мкм – 28 растений и т. д. (см. табл. 1). По выявленным данным была построена диаграмма 1 (рис. 2).

Таблица 1. Таблица диапазонов полярного радиуса и количества растений, попадающих в данный диапазон

Диапазон, мкм	0–10	10–20	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–90	90–100
№ диапазона	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кол-во растений, шт.	0	6	28	22	10	4	1	0	12

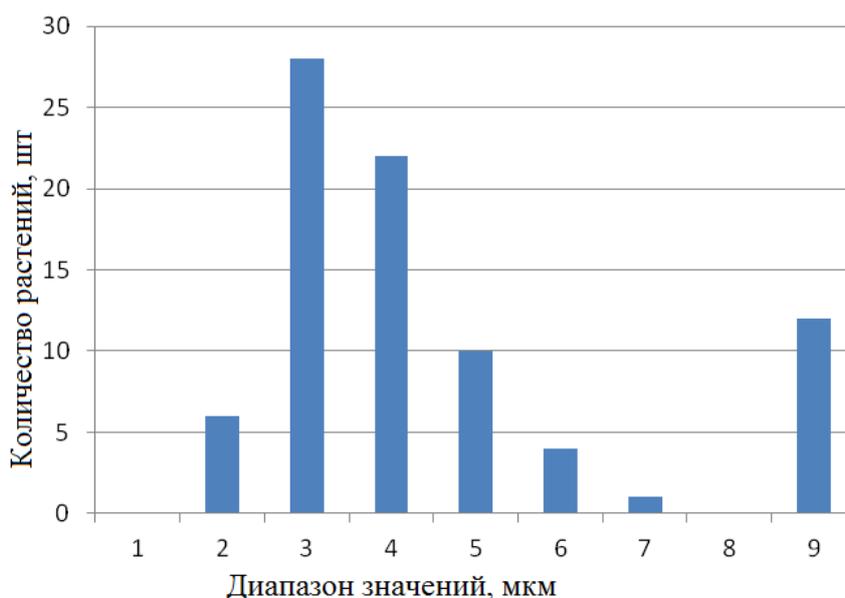


Рис. 2. Диаграмма для полярного радиуса

Для экваториального диаметра было выявлено, что максимальное число растений (25 шт.) лежит в диапазоне от 40 до 50 мкм

и т. д. (см. табл. 2). По выявленным данным была построена диаграмма 2 (рис. 3).

Таблица 2. Таблица диапазонов экваториального диаметра и количества растений, попадающих в данных диапазон

Диапазон, мкм	0–10	10–20	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–90	90–100
№ диапазона	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кол-во растений, шт	0	10	15	25	13	4	1	1	1

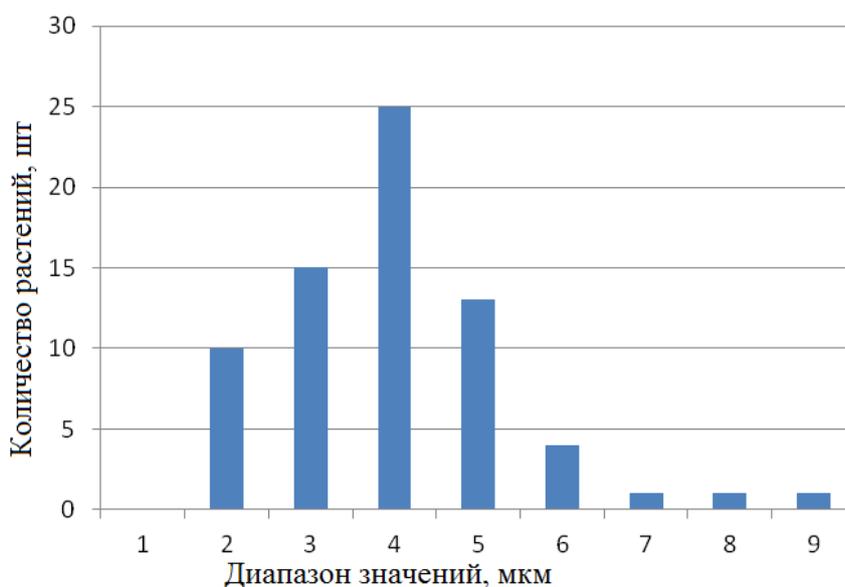


Рис. 3. Диаграмма экваториального радиуса

Опыт работы на оптическом микроскопе показывает, что в основном используются контурные очертания пыльцевых зерен.

Очертание – это отношение длинной оси к короткой (контур).

Более детальные исследования двумерных оптических изображений (исследования текстуры борозд, спор, апертуры и т. д.) затруднительны. Опытный оператор может сделать классификацию и по текстуре. Но автоматизировать процесс классификации по текстуре или скульптуре с использованием изображения с оптического микроскопа практически невозможно.

Компьютеризация пылевого анализа возможна при наличии изображений, полученных с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Кроме того, появляется возможность использовать ряд дополнительных признаков. Эти признаки содержатся в текстуре, скульптуре, форме пор и т. д. Возможно, что для классификации с использованием этих признаков не понадобится контурное изображение пылевого зерна и его размера.



Рис. 4. Некоторые типы скульптуры, полученные на сканирующем электронном микроскопе: а – бугорчатая, б – струйчатая, в – шиповатая, г – гребневидная, д – сетчатая, е – сетчато-гранулярная

*Апертуры* (от латинского *apertura* – отверстие) – тонкие участки экзины зерна, необходимые для выхода живого содержимого пыльцы при их прорастании. Разновидности апертур и их внешний вид приведены на рис. 5.

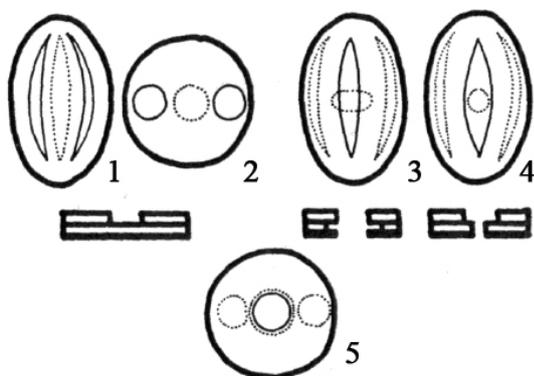


Рис. 5. Типы апертур [по Мейер – Меликян, 1999]: 1 – борозды, 2 – поры, 3 – бороздно-оровые, 4 – бороздно-поровые, 5 – порово-оровые апертуры

При работе с пылью-обножкой мы сравнили фармакологическое действие пыльцы-обножки различных растений с результатами по фитотерапии [7]. Оказалось, что пыльца-обножка, полученная с растений одного семейства, имеет одинаковое фармакологическое действие. Поэтому вопрос распознавания и классификации зерен для этих целей может вестись по признаку при отнесении данной пыльцы-обножки к семейству растений (см. таблицу по видам из [8]).

Мы сравнили изображения пылевых зерен, полученные с помощью РЭМ для семейств растений, и обнаружили, что у представителей одного семейства растений вид пылевых зерен отличается незначительно.

*Скульптура* (рис. 4) – строение поверхности зерна, которое формируется в большей степени элементами экзины [9]. Выделяют разные типы скульптур пылевых зерен (гладкая, шиповая, гребневидная и др.) [10].

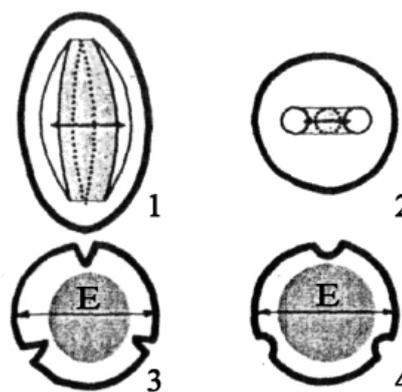


Рис. 6. Межапертурные участки [по Мейер – Меликян, 1999]: 1 – мезокольпий, 2 – мезопорий, 3 – апокольпий, 4 – апопорий, E – экваториальный диаметр

Разновидности тетрад [11] приведены на рис. 7.

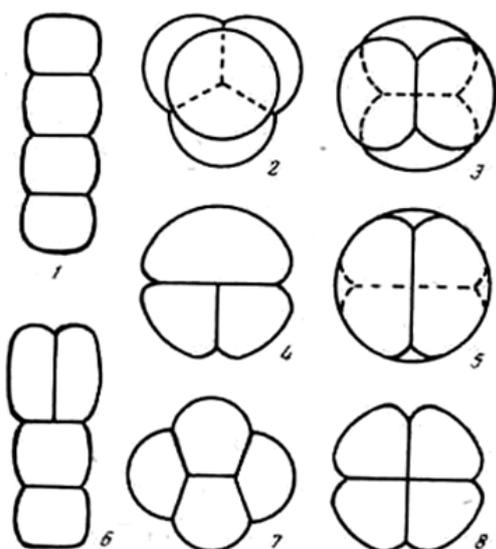


Рис. 7. Тетрады: 1 – линейная, 2 и 3 – тетраэдрическая, 4 и 5 – крестообразная, 6 – Т-образная, 7 – ромбическая, 8 – изобилатеральная (квадратная)

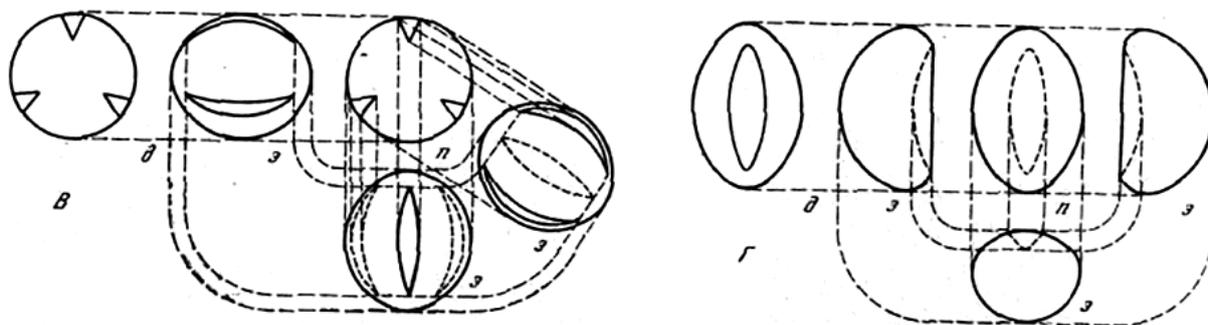


Рис. 8. Основные морфологические типы пыльцевых зерен и спор. Споры (А и Б) и пыльцевые зерна (В и Г) гетерополярные (А, Б и Г) и изополярные (В), радиально-симметричные (А и В) и билатерально-симметричные (Б и Г). Положения пыльцевых зерен и спор:  $\delta$  – дистально-полярное,  $\pi$  – проксимально-полярное,  $\varepsilon$  – экваториальное

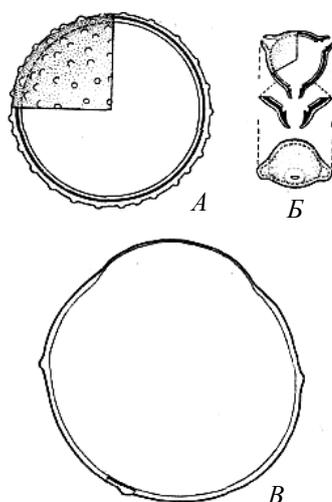


Рис. 9. Неполярное пыльцевое зерно (А), почти изополярное пыльцевое зерно (Б) и скрытополярное пыльцевое зерно (В)

У пыльцевых зерен, формирующихся в тетраэдрических, изобилатеральных и крестообразных тетрадах (а таких огромное большинство), различают две стороны – проксимальную и дистальную (рис. 8). Своими проксимальными сторонами пыльцевые зерна обращены при развитии внутрь тетрады, дистальными – наружу.

Г. Эрдтман (Erdtman) [12, 13] называет полярными (изополярными и гетерополярными) те пыльцевые зерна и споры, полярность которых легко обнаруживается и после распада тетрады (рис. 9).

### Примеры классификации

Для распознавания пыльцевых зерен по их форме существует морфологическая система классификации спор и пыльцевых зерен (по Erdtman и Vishnu-Mittre), основанная на определении отношения длины полярной оси к длине экваториального диаметра зерна.

Существует система классификации Эрдтмана и Вишну – Миттре по форме, суть которой состоит в классификации по отношению длины полярной оси к длине экваториального диаметра зерна [14]. Этими же учеными были предприняты попытки создать морфографическую систему классификации пыльцевых зерен, систематизировав пыльцу по морфологии (характеру, положе-

нию апертур, борозд, пор) в терминологическом порядке.

Характерная черта пыльцевых зерен – симметрия – это способность пыльцевых зерен быть рассеченными плоскостями, проходящими через оба полюса, на абсолютно равные половины. Иначе пыльцевые зерна – асимметричные.

Пыльцевые зерна подразделяют на билатерально-симметричные и радиально-симметричные.

Зерна, принадлежащие к первой категории, можно рассечь двумя взаимно перпендикулярными плоскостями, у которых есть пересечение по полярной оси.

Радиально-симметричные пыльцевые зерна можно рассечь двумя и более взаимно пересекающимися плоскостями по полярной оси.

### **Выводы**

Проанализированы параметры пыльцевых зерен, которые можно рекомендовать для надежного автоматизированного компьютерного распознавания с целью классификации их по принадлежности к тому или иному виду растений.

Общее количество параметров, которые можно использовать как информационные, огромно и исчисляется сотнями. И это несмотря на то, что мы ограничились в данной статье лишь внешними характеристиками – морфометрическими и цветовыми.

Классический пыльцевой анализ с помощью оператора и оптического микроскопа не удовлетворяет и чаще всего невозможен для решения современных задач пыльцевого анализа.

Перспективно использовать автоматизированный компьютерный автоматизированный процесс и программы распознавания и классификации.

Переход от оптического микроскопа к растровому электронному наряду с многократным увеличением информационных параметров обеспечивает надежность распознавания, количество пыльцевых зерен, скорость процедуры анализа.

Упрощение пыльцевого анализа без ущерба для требований к качеству решаемой задачи целесообразно путем использования апостериорной информации.

Эта информация определяется сферой, к которой относится задача анализа, предварительным изучением объекта исследования и договоренностью с потребителем конечного результата.

Мы выделили восемь сфер применения пыльцевого анализа:

1. На рынке продуктов пчеловодства. Анализ меда по ботаническому и географическому происхождению (липовый, цветочный, Алтайский, Башкирский, Китайский и т. п.).

2. В фармацевтической промышленности. Производство лекарственных препаратов из пыльцы.

3. В экологии. Апимониторинг загрязнения окружающей среды по наличию в продуктах пчеловодства тератоморфных пыльцевых зерен. Обнаружение пыльцы генномодифицированных растений.

4. В палинологии. Изучение эволюции фауны в процессе развития жизни на Земле.

5. В судмедэкспертизе. Идентификация местоположения личности по пыльце с образцов одежды.

6. В аллергодиагностике. Контроль за появлением в воздухе, продуктах пчеловодства (например, в меде, пыльце-обножке) пыльцы-аллергена.

7. В растениеводстве. Контроль опыляемости пчелами сельскохозяйственных энтофильных растений.

8. В пищевой промышленности. Обнаружение пыльцевых зерен генномодифицированных растений.

Упрощение процедуры пыльцевого анализа ярко иллюстрируется на рынке продуктов пчеловодства при анализе меда по ботаническому происхождению. Если производитель меда позиционирует свой товар как «мед липовый», то для анализа достаточно подсчитать количество пыльцы липы не обращая внимания на другие сора. Далее, применяя решающее правило по ГОСТ, определить соответствует или нет данный мед позиционированному как «мед липовый». Даже если производитель позиционирует свой мед как цветочный, нет необходимости в полном «цветочном» анализе. Помощь в упрощении анализа (то есть сокращении числа видов растений) можно найти из об-

щения с пчеловодом о месте сбора меда, времени сбора его, а также из фенологических наблюдений краеведов о времени цветения и нектаровыделения цветами в данном году.

Постановка задач классификации пыльцевых зерен по виду предполагает наличие эталонных изображений зерен, полученных как в оптическом, так и растрово-электронном микроскопах. Атласы изображений зерен можно найти в литературе.

### Библиографические ссылки

1. Пат. на изобретение 2488996. Способ получения монофлорной пыльцы-обножки / Ломаев Г. В., Водеников С. К., Ломаев И. Г., Артамонов В. А.
2. Ломаев Г. В., Петышин А. В. Идентификация ботанического происхождения пыльцевой обножки по цветовому спектру // Пчеловодство. 2018. № 3. С. 47–50.
3. Хорн Х. Все о меде. М. : АСТ-Астрель, 2007.
4. Кузьмичев В. Е. Биология пчел и организация пасеки. Калуга : Изд-во КГПУ им. К. Э. Циолковского, 2008. С. 85.
5. Бурмистров А. Н., Никитина В. А. Медоносные растения и их пыльца: Справочник. М. : Росагропроиздат, 1990. 192 с.
6. Хорн Х. Все о меде. М. : АСТ-Астрель, 2007.
7. Ломаев Г. В., Камалова Ю. Б., Емельянова М. С. Технология компьютерного пыльцевого анализа меда : учеб. пособие. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013. 92 с.
8. Там же.
9. Курманов Р. Г., Ишбирдин А. Р. Палинология : учеб. пособие. Уфа : РИЦ БашГУ, 2012. 92 с.
10. Токарев П. И. Палинология древесных растений, произрастающих на территории России : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.05 / Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Биол. фак. М., 2004. С. 26.
11. Сладков А. Н. Введение в спорово-пыльцевой анализ. М. : Наука, 1967. С. 30.
12. Там же. С. 45.
13. Там же. С. 50.
14. Там же. С. 50.

### References

1. Lomaev G. V., Vodenikov S. K., Lomaev I. G., Artamonov V. A. Pat. On invention 2488996. *Sposob polucheniya monoflornoi pyl'tsy-obnozhki* [Method of obtaining monoflorous pollen-renewal] (in Russ.).
2. Lomaev G. V., Petyshin A. V. (2018). *Pchelovodstvo* [Beekeeping], no. 3, pp. 47-50 (in Russ.).
3. Khorn Kh. (2007). *Vse o mede* [Everything about honey]. Moscow: AST-Astrel' (in Russ.).
4. Kuz'michev V. E. (2008). *Biologiya pchel i organizatsiya paseki* [Biology of bees and the organization of apiaries]. Kaluga: Izd-vo KGPU im. K.E. Tsiolkovskogo. P. 85 (in Russ.).
5. Burmistrov A. N., Nikitina V. A. (1990). *Medonosnye rasteniya i ikh pyl'tsa: Spravochnik* [Honey plants and their pollen: Directory]. Moscow: Rosagroproizdat., 192 p. (in Russ.).
6. Khorn Kh. (2007). *Vse o mede* [Everything about honey]. Moscow: AST-Astrel' (in Russ.).
7. Lomaev G. V., Kamalova Yu. B., Emel'yanova M. S. (2013). *Tekhnologiya komp'yuternogo pyl'tseвого analiza meda* [Technology of computer pollen analysis of honey]. Izhevsk : Izd-vo IzhGTU, 92 p. (in Russ.).
8. Ibid.
9. Kurmanov R. G., Ishbirdin A. R. (2012). *Palinologiya* [Palynology: a study guide]. Ufa: RITs BashGU, 92 p. (in Russ.).
10. Tokarev P. I. (2004). *Palinologiya drevesnykh rastenii, proizrastayushchikh na territorii Rossii* [Palinology of woody plants growing on the territory of Russia: the author's abstract of the dissertation]. Abstract of the Doctor of Biological Sciences. Moscow: Mosk. gos. un-t im. M.V. Lomonosova. Biol. fak., p. 26 (in Russ.).
11. Sladkov A. N. (1967). *Vvedenie v spорово-pyl'tsevoi analiz* [Introduction to spore-pollen analysis]. Moscow, p. 30 (in Russ.).
12. Ibid. P. 45.
13. Ibid. P. 50.
14. Ibid. P. 50.

\*\*\*

### Information Features for the Computer Classification of Pollen Grains

G. V. Lomaev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
Yu. B. Kamalova, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*In this paper, information features for the computer classification of pollen grains are considered, and their morphological structure is analyzed with consideration of geometric features at different levels. The dimensions (equatorial diameter and polar radius, etc.), outlines, sculpture, aperture, texture, polarity of the pollen grains were revealed as recognition descriptors. The example of pollen grain classification is given. The intervals and the number of plants that fall within these intervals according to the characteristics (the equatorial diameter and the polar radius), were found. For the equatorial diameter, it was found that the maximum number of plants (25 pieces) lies in the range from 40 to 50  $\mu\text{m}$ , etc. According to the findings, a table of ranges of the equatorial diameter and the number of plants falling within the data range and a diagram were constructed.*

*It was found that no plants fell within the range of values of the polar radius from 0 to 10  $\mu\text{m}$ , 6 plants fell into the range from 10 to 20  $\mu\text{m}$ , from 28 to 20  $\mu\text{m}$  to 28  $\mu\text{m}$ , etc. Based on the data, a table of the ranges of the polar radius and the number of plants falling within the data range and a diagram were constructed.*

**Keywords:** computer pollen analysis, pollen of plants, image recognition, botanical origin of honey, pollen grains, computer classification of pollen grains.

Получено: 28.05.18