

ИНФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНЫЙ АНАЛИЗ ТАКСОНОМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ФЛОРЫ И ФАУНЫ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ГПЗ «ОПУКСКИЙ» (ФГБУ «ЗАПОВЕДНЫЙ КРЫМ»)

И.А. Сикорский

ФГБУ «Объединенная дирекция ООПТ «Заповедный Крым», Россия
e-mail: falco72@yandex.ru

Физико-географические особенности обуславливают высокую степень разнородности экологических факторов, влияющих на разнообразие экосистем, на их флору и фауну. Данные по информационно-энтропийному анализу таксономической структуры флоры и фауны имеют потенциально высокую значимость для оценки современного состояния и актуального прогнозирования развития наземных экосистем природного заповедника «Опукский». Тип Chordata представлен 360 видами животных, принадлежащих к 223 родам, 108 семействам, 48 отрядам и 8 классам. Показатели текущей энтропии на уровне классов образуют ряд в направлении возрастания неопределенности таксономической структуры от минимального ($H=1.606$) к максимальному значению ($H=2.585$). Значения относительной организации таксономической структуры Chordata на уровне классов формируют убывающий ряд и находятся в интервале $R = 0.379 - 0$. Отдел Magnoliophyta представлен 433 видами растений, принадлежащих к 233 родам, 56 семействам, 47 порядкам и 2 классам. Значения текущей неопределенности таксономической структуры покрытосеменных на уровне классов находятся в интервале $H = 1.473-1.565$. Отдел Polypodiophyta представлен 4 видами растений, принадлежащих к 3 родам, 2 семействам, 2 порядкам и 1 классу. Значения текущей информационной энтропии таксономической структуры папоротниковидных на уровне отдела и класса составляет $H = 2.412$. Отдел Gnetophyta представлен 1 видом растения, принадлежащим к 1 роду, 1 семейству, 1 порядку и 1 классу. Значения текущей неопределенности такого соотношения таксонов в иерархической структуре совпадает с максимально возможной неопределенностью и составляет $H = 2.585$.

Ключевые слова: экосистемы, энтропия, Опук, таксономическая структура, неопределенность, относительная организация

Введение

Природный заповедник «Опукский» (далее – заповедник), площадь которого 1592.3 га, расположен на юге Керченского полуострова. В его границах находятся: гора Опук, соленое озеро Кояшское (площадь зеркала – 552 га) и прилегающая акватория Черного моря (60 га) с островками Скалы-Корабли (2 га).

Физико-географические особенности обуславливают высокую степень разнородности экологических факторов, влияющих на разнообразие экосистем, на их флору и фауну. Часть этих экосистем, согласно Рамсарской конвенции (775 га), имеет международное значение и интегрируется в Европейскую экологическую сеть. В ее пределах гнездится несколько десятков видов, внесенных в Красную книгу Республики Крым, в том числе располагаются колонии редких околоводных птиц (Сикорский, 2017).

В целом, заповедник представляет собой сложный географический узел, в экосистемах которого сконцентрирован уникальный набор видов флоры и фауны.

Без целостного, системного анализа экосистем невозможно решать вопросы оптимального управления данной территорией и сохранения биологического разнообразия заповедника.

Проблемы охраны биологического разнообразия, экологический мониторинг и экологическое прогнозирование не могут быть реализованы без фундаментальных экологических исследований и в первую очередь флоры и фауны комплексов биогеоценозов заповедника.

Без объединения этих видов в неразрывный комплекс биогеоценозных экосистем, невозможно решать сложнейшие проблемы сохранения биологического разнообразия флоры и фауны в условиях негативного влияния антропогенного фактора и глобальных климатических изменений.

Материалы и методы

Изучение состава, структуры и разнообразия биогеоценозов, входящих в состав заповедника, осуществлялось на протяжении 2018–2021 гг. В работе использованы списки флоры и фауны, представленные в «Летописях природы» (Сикорский, 2020), дополненные материалами, собранными в 2011–2017 гг. на территории 20-ти кварталов заповедника. Биота заповедной акватории не являлась объектом нашего исследования.

В соответствии с делением изучаемой территории на три района были заложены экологические профили по методике А.А. Юнатова (Сикорский, 2018), протяженностью от 300 до 1500 м от солончаковой приморской полосы до агроценозов у северных границ заповедника. Дополнительно для выявления относительно редко встречающихся видов флоры и фауны использовали метод маршрутного сбора на прилегающих к профилям территориях.

Протяженность 5 учетных маршрутов составляла 37 км, ширина учетной полосы для мелких птиц была 100 м, для средних и крупных 300 м (Сикорский, 2015). Регулярно проводили фенологические наблюдения за флорой и фауной заповедника.

К основным методам изучения таксономической структуры относились: установление показателей абсолютного богатства таксонов (видов, родов, семейств и т.д.), относительные показатели – количество видов в родах, родов в семействах и т.д.

По материалам исследований авторов И.А. Сикорского и В.М. Громенко (2015), для описания сложности таксономической структуры использовались алгоритмы с использованием индекса К. Шеннона (H):

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i$$

где p_i – число таксонов низшего ранга в составе каждого таксона высшего ранга,

H – функция, которая принимает максимальное значение тогда, когда имеет место полная выравненность распределения, при этом высшие таксоны содержат одинаковое число низших таксонов.

Общее видовое разнообразие в списках растений и животных, участвующих в обработке, составляло 798–1481 видов. Статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием компьютерных программ: Statistica 6.0, Excel 2003, а также согласно принципам и методам количественного анализа в фаунистических исследованиях.

Результаты и обсуждение

Учитывая все вышесказанное, информационно-энтропийный анализ таксономической структуры флоры и фауны заповедника, связанных единым комплексом экологических факторов, в условиях экосистем заповедника приобретает особую актуальность. Кроме того, данные по информационно-энтропийному анализу таксономической структуры флоры и фауны практически отсутствуют. Все эти вопросы имеют потенциально высокую значимость для оценки современного состояния и актуального прогнозирования развития флоры и фауны заповедной территории.

Данные о флористическом и фаунистическом составе, экологической и таксономической структуре ранее мало изученного компонента биогеоценозов юга Керченского полуострова в дальнейшем могут быть использованы для повышения точности прогнозирования и моделирования появления новых видов. Наличие во флоре и фауне видов вселенцев, в том числе не указанных для региона исследования в Черной книге Средней России (2010), позволяет рассматривать информационно-энтропийный анализ в качестве одного из инструментов выявления потенциального риска внедрения адвентивных и карантинных видов. Подобные

методики могут быть положены в основу проверки эталонности биотопов, для предотвращения распространения адвентивных и карантинных видов.

С учетом особенностей состава цено- и экоморф флоро-фаунистических комплексов, выделены следующие основные типы биогеоценозов: прибрежно-морские (14% площади заповедника), солончаково-озерные (31%) и скально-степные (55%) (Сикорский, Громенко, 2015).

Сравнение вышеуказанных типов показало, что наибольшим сходством (до 65%), обладают прибрежно-морские и солончаково-озерные, а наименьшим (до 10%) – скально-степные и солончаково-озерные.

Среди экологических типов растений (гигроморф) доминируют – мезоксерофиты и ксеромезофиты, а среди животных – виды с широкой экологической валентностью к гигротопу – эвригигрофилы. Среди растительных галоморф господствуют гликофиты – 80% от общего количества видов растений, у животных преобладает гликофилы – 70.6% соответственно (Сикорский, Громенко, 2015–2017).

**ЦАРСТВО РАСТЕНИЯ
ОТДЕЛ ПОКРЫТОСЕМЕННЫЕ (MAGNOLIOPHYTA)**

Отдел представлен 433 видами растений, принадлежащих к 233 родам, 56 семействам, 47 порядкам и 2 классам. Значения текущей неопределенности таксономической структуры покрытосеменных на уровне классов находятся в интервале $H = 1.473–1.565$ (рис. 1).

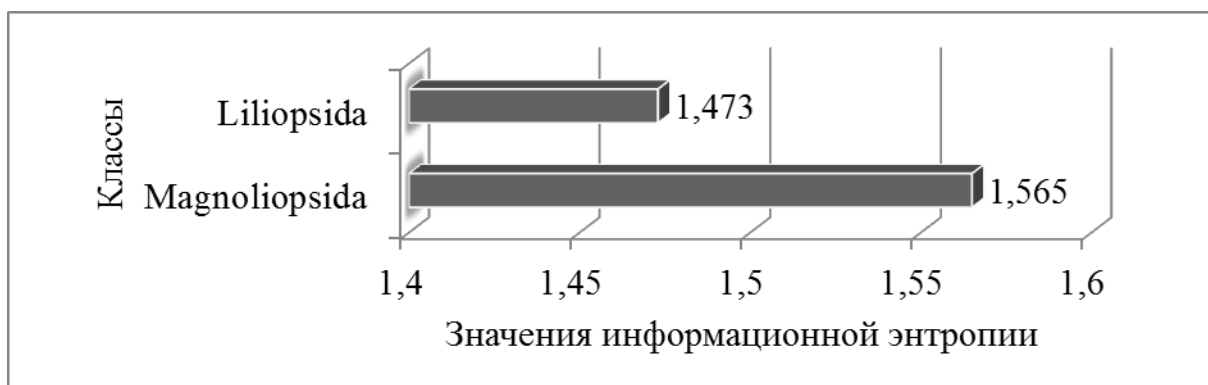


Рис. 1. Неопределенность таксономической структуры отдела Magnoliophyta природного заповедника «Опукский».

Fig. 1. Uncertainty of the taxonomic structure of the order of Magnoliophyta of the Opuksky Nature Reserve.

На уровне типа и классов по показателям сложности (Hm) и относительной организации (R) таксономические системы определяются как простые детерминированные (табл. 1).

Таблица 1. Сложность (Hm) и организация (R) таксономической структуры отдела Magnoliophyta природного заповедника «Опукский»

Table 1. Complexity (Nm) and organization (R) of the taxonomic structure of the department of Magnoliophyta of the Opuksky Nature Reserve

Таксоны	Классификация таксономических систем
Отдел Покрытосеменные (Magnoliophyta)	$0 \leq Hm (2.585) \leq 3$ и $0.3 < R (0.402) \leq 1$ Простая детерминированная
Класс Однодольные (Liliopsida)	$0 \leq Hm (2.585) \leq 3$ и $0.3 < R (0.431) \leq 1$ Простая детерминированная
Класс Двудольные (Magnoliopsida)	$0 \leq Hm (2.585) \leq 3$ и $0.3 < R (0.395) \leq 1$ Простая детерминированная

ОТДЕЛ ПАПОРОТНИКОВИДНЫЕ (POLYPODIOPHYTA)

Отдел представлен 4 видами растений, принадлежащих к 3 родам, 2 семействам, 2 порядкам и 1 классу. Значения текущей информационной энтропии таксономической структуры папоротниковидных на уровне отдела и класса составляет $H = 2.412$.

При сочетании показателей максимальной неопределенности (Hm) и относительной организации (R) таксономическая структура типа и класса классифицируется как простая вероятностная система (табл. 2).

Таблица 2. Сложность (Hm) и организация (R) таксономической структуры отдела Polypodiophyta природного заповедника «Опукский»

Table 2. Complexity (Nm) and organization (R) of the taxonomic structure of the division of Polypodiophyta of the Opuksky Nature Reserve

Таксоны	Классификация таксономических систем
Отдел Папоротниковидные (Polypodiophyta) Класс Папоротниковые (Polypodiopsida)	$0 \leq Hm (2.585) \leq 3$ и $0 < R (0.067) \leq 0,1$ Простая вероятностная

ОТДЕЛ ГНЕТОВИДНЫЕ (GNETOPHYTA)

Отдел представлен 1 видом растения, принадлежащим к 1 роду, 1 семейству, 1 порядку и 1 классу. Значения текущей неопределенности такого соотношения таксонов в иерархической структуре совпадает с максимально возможной неопределенностью и составляет $H = 2.585$.

Если текущая энтропия совпадает по значению с максимальной неопределенностью системы, а показатель относительной организации равен $R = 0$, то такая система считается полностью дезорганизованной (Глушков и др., 1980). Соответственно данная система по двум коэффициентам (Hm и R) определяется как простая дезорганизованная (табл. 3).

Таблица 3. Сложность (Hm) и организация (R) таксономической структуры отдела Gnetophyta природного заповедника «Опукский»

Table 3. Complexity (Nm) and organization (R) of the taxonomic structure of the division of Gnetophyta of the Opuksky Nature Reserve

Таксоны	Классификация таксономических систем
Отдел Гнетовидные (Gnetophyta) Класс Гнетовые (Polypodiopsida)	$0 \leq Hm (2.585) \leq 3$ и $0 \leq R (0) \leq 0,1$ Простая дезорганизованная

ЦАРСТВО ЖИВОТНЫЕ

ТИП ХОРДОВЫЕ (CHORDATA)

Тип представлен 360 видами животных, принадлежащих к 223 родам, 108 семействам, 48 отрядам и 8 классам. Показатели текущей энтропии на уровне классов образуют ряд в направлении возрастания неопределенности таксономической структуры от минимального ($H = 1.606$) к максимальному значению ($H = 2.585$) (рис. 2).

В целом по ряду значение энтропии увеличилось на $\Delta u_6 = 0979$ со средним темпом прироста на каждый класс в $\bar{T}_{\text{пр}} = 7\%$. Средняя энтропия по ряду составляет $\bar{y} = 2.173$. В целом все таксоны категории класса не превышают нижнего предела информационной емкости системы в 62.1%.

Значения относительной организации таксономической структуры Chordata на уровне классов формируют убывающий ряд и находятся в интервале $R = 0.379 - 0$.

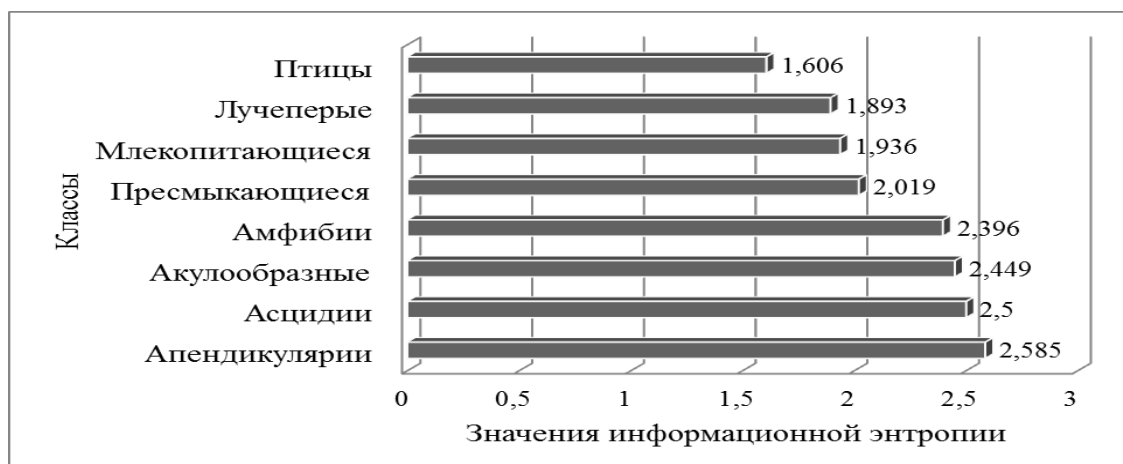


Рис. 2. Неопределенность таксономической структуры Chordata природного заповедника «Опукский».

Fig. 2. Uncertainty of the taxonomic structure of the Chordata of the Opuksky Nature Reserve.

На уровне типа по показателям сложности (Hm) и относительной организации (R) таксономическая система определяется как простая детерминированная. На уровне классов наблюдается значительное разнообразие в классификации. Один таксон относится к простой детерминированной системе. По 3 принадлежат к простым вероятностно-детерминированным и простым вероятностным системам. И один класс с текущей энтропией равной максимальной ($H = Hm = 2.585$) характеризуется как простая дезорганизованная структура.

Заключение

Информационно-энтропийный анализ таксономической структуры флоры и фауны по сложности организации позволил выделить три группы: 1. Как простая вероятностная система характеризуется фауна земноводных. 2. Как простая вероятностно-детерминированная система – фауны моллюсков, пресмыкающихся и млекопитающих. 3. Как простая детерминированная система – флора покрытосеменных, а также фауна птиц и членистоногих.

Из теории информации известно, что чем ниже текущая энтропия системы, тем выше ее стабильность в функционировании. Чем выше детерминация системы, тем сильнее связи между ее компонентами.

Информационный анализ двух классов отдела покрытосеменных показал, что наименьшей неопределенностью таксономической структуры обладают двудольные (энтропия – 1.520). Аналогичный анализ фауны по трем типам установил, что наименьшей информационной энтропией (1.338) обладают членистоногие, а среди хордовых – птицы (энтропия – 1.606) (Сикорский, Громенко, 2015, 2015а).

В результате антропогенного влияния отдельные систематические категории флоры и фауны могут перемещаться в ту или иную группу, в конечном результате приближаясь к точкам бифуркации 0 или 1, где они или перестраиваются, или распадаются.

Таким образом, информационно-энтропийный анализ таксономической структуры флоры и фауны, как в целом, так и отдельно по систематическим категориям, позволяет прогнозировать состояние изучаемых групп в будущем. И соответственно разрабатывать пакеты природоохранных мероприятий, направленных на сохранение уникальнейших экологических систем заповедника.

Полученные в ходе исследования данные вносят вклад в понимание механизмов возобновления и функционирования биогеоценозов заповедника. Выявленные в ходе исследований особенности состава и таксономической структуры флоры и фауны наземных экосистем заповедника вносят вклад в теоретические положения экологии флоры и фауны, раскрывая их взаимодействие на границе разных экосистем.

В связи с этим нужно отметить, что для сохранения биоты заповедника, как одного из уникальных, ценных участков юга Керченского полуострова, необходимо обеспечить его охрану как в целом местообитания многих редких, так и фоновых видов. Необходимо в дальнейшем снизить и регулировать рекреационную нагрузку на территорию, исключить возможность ее преобразования.

Благодарности

Автор статьи благодарит В.М. Громенко за методическую помощь.

Список литературы

Глушков В. М., Каспшицкая М. Ф., Сергиенко И. В. 1980. Вопросы формализации и решения одного класса задач дискретной оптимизации // Журнал вычислительной математики и математической физики. Т. 20. №6. С. 1384–1399.

Сикорский И. А. 2018. Информационно-энтропийный анализ таксономической структуры флоры и фауны заповедника «Опукский» // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». Выпуск 9. «Сохранение биологического разнообразия и заповедное дело в Крыму». Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 45-летию создания особо охраняемой природной территории «Мыс Мартьян», 23–26 октября 2018 г. Ялта. С. 75–77.

Сикорский И. А. 2020. Летопись природы заповедника «Опукский», книга 21. Феодосия. 204 с.

Сикорский И.А. 2015. Видовой состав и таксономическая структура орнитофауны в биогеоценозах ГБУПЗ «Опукский» // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (г. Сочи, 2–4 декабря 2015 г.). Сочи. С. 290–297.

Сикорский И.А., Громенко В.М. 2015. Таксономическая структура орнитофауны степных биогеоценозов ГБУ ПЗ «Опукский» (Крым) // Степи Северной Евразии: материалы VII международного симпозиума / под науч. ред. чл.-корр. РАН А.А.Чибилёва. Оренбург: ИС УрО РАН, Печатный дом «Димур». С. 767–769.

Сикорский И.А., Громенко В.М. 2015а. Таксономическая структура орнитофауны солончаково-озерного биогеоценоза ГБУПЗ «Опукский» // Охрана природной среды и эколого-биологическое образование: сборник материалов международной научно-практической конференции, г. Елабуга, 25–26 ноября 2015 года. Елабуга: Издатель Леонтьев В.В. С. 168–171.

Сикорский И.А., Громенко В.М. 2016. Разнообразие и сложность таксономической структуры высших растений биогеоценозов ГБУПЗ «Опукский» // II научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского» (Симферополь, 2016), сборник тезисов участников. Симферополь. Т.7. 1-я часть. С. 483–485.

Сикорский И.А., Громенко В.М. 2017. Видовой состав и сложность таксономической структуры орнитофауны в биогеоценозах ГБУПЗ «Опукский» // Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования: материалы Всероссийской научно-практической конференции (Керчь, 26 сентября – 1 октября 2017г.). Симферополь: ИТ «АРИАЛ». С. 125–130.

References

Glushkov V. M., Kaspshitskaya M. F., Sergienko I. V. 1980. Questions of formalization and solution of one class of discrete optimization problems // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. Vol. 20. №6. P. 1384–1399. [In Russian]

Sikorsky I. A. 2018. Information and entropy analysis of the taxonomic structure of the flora and fauna of the Opuksky Nature Reserve // Scientific notes of the Cape Martian Nature Reserve Issue 9 Cape Martian "Conservation of biological diversity and conservation in the Crimea" Materials of a scientific and practical conference with international participation dedicated to the 45th anniversary of the creation of the Specially Protected Natural Area "Cape Martian" on October 23–26, 2018. Yalta. P. 75–77. [In Russian]

Sikorsky I.A. 2015. Species composition and taxonomic structure of avifauna in ecosystems of SBINR "Opuksky" // Sustainable development of specially protected natural territories: materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference (Sochi, December 2–4, 2015). Sochi. P. 290–297. [In Russian]

Sikorsky I.A. 2020. Chronicle of Nature Reserve "Opuksky", book 21. Feodosia. 204 p.

Sikorsky I.A., Gromenko V.M. 2015. Taxonomic structure of bird fauna of steppe ecosystems of SBINR "Opuksky" (Crimea) // Steppes of Northern Eurasia: proceedings of the VII International Symposium / under scientific ed. chl.-corr. RAS A.A. Chibilev. Orenburg: IS UrO RAS, Dimur Printing House. P. 767–769. [In Russian]

Sikorsky I.A., Gromenko V.M. 2015a. Taxonomic structure of the bird fauna of the saline-lake ecosystems of the SBINR "Opuksky" // Environmental protection and ecological and biological education: collection of materials of the international scientific and practical conference, Yelabuga, November 25–26, 2015. Yelabuga: Publisher V.V. Leontiev. P. 168–171. [In Russian]

Sikorsky I.A., Gromenko V.M. 2016. Diversity and complexity of the taxonomic structure of higher plants of ecosystems of SBINR "Opuksky" // II scientific conference of faculty, graduate students, students and young scientists "Days of science of the V.I. Vernadsky KFU" (Simferopol, 2016), collection of abstracts of participants. Simferopol. Vol. 7(1). P. 483–485. [In Russian]

Sikorsky I.A., Gromenko V.M. 2017. Species composition and complexity of the taxonomic structure of avifauna in ecosystems of SBINR "Opuksky" // Actual problems of biodiversity and nature management: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Kerch, September 26 – October 1, 2017). Simferopol: IT "Arial". P. 125–130. [In Russian]

**INFORMATION AND ENTROPY ANALYSIS OF THE TAXONOMIC
STRUCTURE OF FLORA AND FAUNA OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS
OF THE SNR "OPUKSKY"(FEDERAL STATE BUDGETARY
INSTITUTION "RESERVED CRIMEA")**

Igor A. Sikorsky

*Federal State Budgetary Institution "United Directorate of Protected Areas "Reserved Crimea",
Republic of Crimea, Russia
e-mail: falco72@yandex.ru*

Physical and geographical features cause a high degree of heterogeneity of environmental factors affecting the diversity of ecosystems, their flora and fauna. Data on the information and entropy analysis of the taxonomic structure of flora and fauna have potentially high significance for assessing the current state and actual forecasting of the development of terrestrial ecosystems of the Opuksky Nature Reserve. The Chordata type is represented by 360 species of animals belonging to 223 genera, 108 families, 48 orders and 8 classes. Indicators of the current entropy at the class level form a series in the direction of increasing uncertainty of the taxonomic structure from the minimum ($H = 1.606$) to the maximum value ($H = 2.585$). The values of the relative organization of the taxonomic structure of Chordata at the class level form a decreasing series and are in the range $R = 0.379–0$. The Magnoliophyta division is represented by 433 plant species belonging to 233 genera, 56 families, 47 orders and 2 classes. The values of the current uncertainty of the taxonomic structure of angiosperms at the class level are in the range $H = 1.473–1.565$. The division of Polypodiophyta is represented by 4 species of plants belonging to 3 genera, 2 families, 2 orders and 1 class. The values of the current information entropy of the taxonomic structure of ferns at the division and class level is $H = 2.412$. The Gnetophyta division is represented by 1 plant species belonging to 1 genus, 1 family, 1 order and 1 class. The values of the current uncertainty of such a ratio of taxa in the hierarchical structure coincide with the maximum possible uncertainty and is $H = 2.585$.

Key words: ecosystems, entropy, Opuk, taxonomic structure, uncertainty, relative organization