

## К ВОПРОСУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ В БИОСФЕРЕ

Г. Т. Фрумин<sup>1, 2✉</sup>, Н. А. Болотова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, ул. Воронежская, д. 79, 192007, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, наб. р. Мойки, д. 48, 191186, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Вологодский государственный университет, пр. Победы, д. 37, 160035, г. Вологда, Россия

### Сведения об авторах

Фрумин Григорий Тевелевич

E-mail: [gfrumin@mail.ru](mailto:gfrumin@mail.ru)

SPIN-код: 9203-5960

Scopus Author ID: 6603777922

Болотова Наталья Львовна

E-mail: [bolotova.vologda@mail.ru](mailto:bolotova.vologda@mail.ru)

SPIN-код: 2784-2847

Scopus Author ID: 6602145301

**Аннотация.** Обсуждено современное состояние актуальной проблемы устойчивости биосферы к антропогенному воздействию. Приведены некоторые наиболее известные примеры ранговых распределений в науке и технике. В проведенном исследовании была применена гиперболическая модель, предложенная А. П. Левичем. На основе рангового (гиперболического) закона распределения установлено статистически значимое соотношение между биомассами (в пересчете на углерод) живых организмов биосферы и их рангами. Показано, что в настоящее время биосфера характеризуется как находящаяся в устойчивом состоянии.

**Права:** © Авторы (2020). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

**Ключевые слова:** биосфера, живые организмы, биомасса, ранговый закон распределения, математическая модель.

## ON THE ISSUE OF THE DISTRIBUTION OF LIVING ORGANISMS IN THE BIOSPHERE

G. T. Frumin<sup>1, 2✉</sup>, N. L. Bolotova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya Str., 192007, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Moika River Emb., 191186, St Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Vologda State University, 37 Pobedy Avenue, 160035, Vologda, Russia

### Authors

Grigory T. Frumin

E-mail: [gfrumin@mail.ru](mailto:gfrumin@mail.ru)

SPIN: 9203-5960

Scopus Author ID: 6603777922

Natalya L. Bolotova

E-mail: [bolotova.vologda@mail.ru](mailto:bolotova.vologda@mail.ru)

SPIN: 2784-2847

Scopus Author ID: 6602145301

**Abstract.** The paper discusses the urgent problem of the biosphere's resilience against anthropogenic impact. The authors offer some of the best-known examples of rank distribution in science and technology. The presented study employed the hyperbolic model proposed by A.P. Levich. On the basis of the rank (hyperbolic) distribution law, a statistically significant ratio was established between the biomass (in terms of carbon content) of living organisms of the biosphere and their ranks. The authors conclude that at present the state of the biosphere may be characterised as stable.

**Copyright:** © The Authors (2020). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY-NC License 4.0.

**Keywords:** biosphere, living organisms, biomass, ranking distribution law, mathematical model.

## ВВЕДЕНИЕ

Закономерности функционирования биосферы, от которых зависит и существование человечества, в значительной мере определяются распределением живых организмов по планете. Разнообразие форм позволило живым организмам освоить практически все местообитания на поверхности Земли за исключением области обширных оледенений и кратеров действующих вулканов. Диапазон температур, в которых может существовать жизнь, составляет примерно 300°C (от –200°C до +100°C), а давления — от долей атмосферы на большой высоте до тысячи и более атмосфер на больших глубинах. Для ряда бактерий верхние критические точки давления лежат в области 12–108 Па (12 тыс. атм.). Семена, споры растений и мелкие животные в анабиозе сохраняют жизнеспособность в полном вакууме (Степановских 2001). В целом живые организмы могут переносить широчайший диапазон физико-химических условий среды.

Выраженная неравномерность распределения организмов связана как с отличием условий для существования живого, так и адаптационными возможностями разных систематических групп. На изменение распределения живых организмов в настоящее время влияют новые, не встречавшиеся в их эволюции факторы, связанные с деятельностью человека (антропогенное воздействие). Отражением данного процесса является прогрессирующее снижение биоразнообразия (Лебедева 2002). Это сопровождается изменением планетарной картины распределения организмов, а также перераспределением численности и биомассы среди таксонов. Использование последнего показателя для оценки устойчивости биосферы правомерно, учитывая роль биотического круговорота веществ через преобразование биомассы живого, которая оценивается величиной порядка  $2,43 \times 10^{12}$  тонн.

Количественная оценка биомасс таксонов активно применяется к более доступ-

ным для наблюдений растениям и животным, тем более что многие виды представляют для человека экономический и социальный ресурс. Гораздо меньше данных имеется о распределении грибов, протистов, а также бактерий, архей и вирусов.

В то же время предпринята попытка оценить роль разных таксонов в биосфере через распределение их биомасс, по убыванию которых для семи таксонов проведено ранжирование (Bar-On et al. 2018).

Цель исследования заключалась в том, чтобы на основе рангового анализа определить по первичным данным взаимозависимость между биомассами различных живых организмов в биосфере и их рангами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Ядром теории рангового анализа является закон рангового распределения (ЗРР) — один из наиболее общих законов развития систем (технических, биологических, социально-экономических, информационных, географических). Уже к 50-м гг. XX в. стало понятно, что многие статистические закономерности, наблюдавшиеся в различных социальных явлениях и получившие названия в честь их первооткрывателей (Ципфа, Эступа, Парето, Брэдфорда и др.), имеют общую математическую форму. Эти закономерности удобно формулировать как некоторые свойства ранговых распределений.

Применением ЗРР в различных областях знаний занимается ценология — наука об устойчивости больших систем. Сами же большие системы, *ценозы* (от греч. «κοινος», что означает «общий») — это сообщество объектов (штук, особей), каждый из которых обладает индивидуальными свойствами и может быть идентифицирован (соотнесен) с каким-либо видом; сообщество, характеризующееся трансцендентными внутренними связями, образованное множеством элементов и субъективно выделенное как целое. Ценоз в биологии — это сообщество или многочисленная совокупность особей, подчиняющаяся ЗРР (Гнатюк 2005). Теория и тер-

минология рангового анализа перенесена из биологии и разработана для технических систем (техноценозов) профессором Б. И. Кудриным с использованием понятий «ценоз», «особь», «популяция», «вид» (Кудрин 1993). Различают биоценозы, техноценозы, социоценозы, информценозы и др. (Пуцин 2010).

Ранговые распределения возникают при изучении многокомпонентных систем различной природы. В любой системе существуют компоненты, сравнительно немногочисленные, которые обладают, в некотором смысле, «высоким статусом» (частотой, распространенностью, доходом, стоимостью и т. п.). Значительно больше компонентов с низким статусом, причем по мере понижения статуса число разных компонентов с этим статусом увеличивается. Обычно эта зависимость является гиперболической; простейшая ее форма известна под названием «закон Ципфа» (Орлов 1996).

Некоторые наиболее известные примеры ранговых распределений (Буховец 2005): в географии — распределение городов по численности населения в некоторых замкнутых регионах (государствах); в биологии — распределение биологических родов по числу видов в них, а также распределение видов по занимаемому ими ареалу; в экономике — распределение населения по уровню доходов; в лингвистике — распределение отдельных слов по частоте их появления в лексически правильном тексте; в наукометрии — распределение научной продуктивности ученых; в информатике — распределение информационных потерь и популярности веб-сайтов.

Ранговые распределения численностей или биомасс групп живых организмов применяются для количественного исследования экологических сообществ. В качестве групп могут выступать биологические таксоны, размерные классы, совокупности особей, объединенные по каким-либо физиологическим или иным признакам (Булгаков, Левич 2005; Левич 1980). Установлено, что в нормальном (не-

нарушенном, фоновом, естественном) состоянии сообщества параметр рангового распределения заключен в определенном диапазоне значений (Левич 1980). Отклонения от рангового распределения могут служить мерой деградации сообщества. Устойчивость сообществ определяется не числом видов, а той их пропорцией, которая обеспечивает необходимую гомеостатичность экологических систем.

Ключ к правильному пониманию поведения сложных систем лежит в изучении эмпирических закономерностей путем построения соответствующих математических моделей (Петров 1980). В современной макроэкологии принято считать, что фундаментальным законом и важным способом отображения структуры сообществ являются ранговые распределения (Пуцин 2010).

Ранговое распределение — это распределение  $W(r)$ , являющееся результатом ранжирования. При ранжировании объекты (особи) системы располагаются в порядке убывания исследуемого параметра  $W$ , при этом каждому объекту присваивается ранговый номер:  $r = 1, 2, 3$  и т. д. Затем строится график зависимости  $W$  от рангового номера  $r$ . Распределение имеет вид гиперболы и называется H-распределением:

$$W = A/r^b, \quad (1)$$

где  $A$  — максимальное значение параметра  $W$  объекта с рангом  $r = 1$ , т. е. в первой точке;  $r$  — ранговый номер особи (1, 2, 3...) в порядке убывания  $W$ ;  $b$  — ранговый коэффициент, характеризующий степень крутизны гиперболы.

Чем ближе экспериментальная кривая распределения приближается к идеальной кривой вида (1), тем устойчивее система.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа были использованы первичные данные, приведенные в работе (Var-On et al. 2018) (табл. 1).

Для феноменологического описания ранговых распределений в экологии применяются различные аппроксимации: экспоненциальная модель, гиперболическая модель, объединяющее их дзета-распре-

Таблица 1  
Распределения биомасс живых организмов  
в биосфере

Table 1  
Distribution of the biomass of living organisms  
in the biosphere

Ранг, r Rank, r	Организмы Organisms	Биомасса, гигатонн, W Biomass, gigatons, W
1	Растения Plants	450
2	Бактерии Bacteria	70
3	Грибы Fungi	12
4	Археи Archea	7
5	Протисты Protists	4
6	Животные Animals	2
7	Вирусы Viruses	0,2

деление, модель «разломанного стержня» (Левич 1980). В данном исследовании была применена гиперболическая модель, предложенная А. П. Левичем.

Для количественного анализа данных, приведенных в таблице, была использована формула (1), преобразованная путем линеаризации к виду:

$$\ln W = \ln A - b \ln r. \quad (2)$$

Данные, приведенные в таблице, были представлены в графической форме ранг/

биомасса (см. рис.). Обращает на себя внимание, что на рисунке отсутствуют anomalously высокие всплески.

Математико-статистическая обработка данных была проведена с использованием табличного процессора Excel. По данным из таблицы была выявлена статистически значимая однопараметрическая линейная зависимость между натуральными логарифмами биомасс и натуральными логарифмами рангов (см. рис. 1):

$$\ln(W) = 6,45 - 3,51 \ln(r) \quad (3)$$

$$n = 7; r = 0,97; r^2 = 0,93; \sigma_{Y(X)} = 0,70; F_p = 70,79; F_T = 5,99; F_p / F_T = 11,8.$$

Здесь n — количество наблюдений, r — коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи между переменными, r<sup>2</sup> — коэффициент детерминации, характеризующий объяснимую долю разброса,  $\sigma_{Y(X)}$  — стандартная ошибка, F<sub>p</sub> и F<sub>T</sub> — расчетное и табличное (при уровне значимости 95%) значения критерия Фишера.

Так как F<sub>p</sub> > F<sub>T</sub>, то формула (3) адекватна.

Согласно шкале Чеддока (Макарова, Трофимец 2002), приведенное значение коэффициента корреляции r = 0,97 свидетельствует о весьма высокой тесноте связи между ln(W) и ln(r). Отклонение значений (точек) от прямой линии на рисунке, вероятно, связано с неточностью (неопределенностью) оценок их фактических значений. Этот фактор (фактор неопределенности)

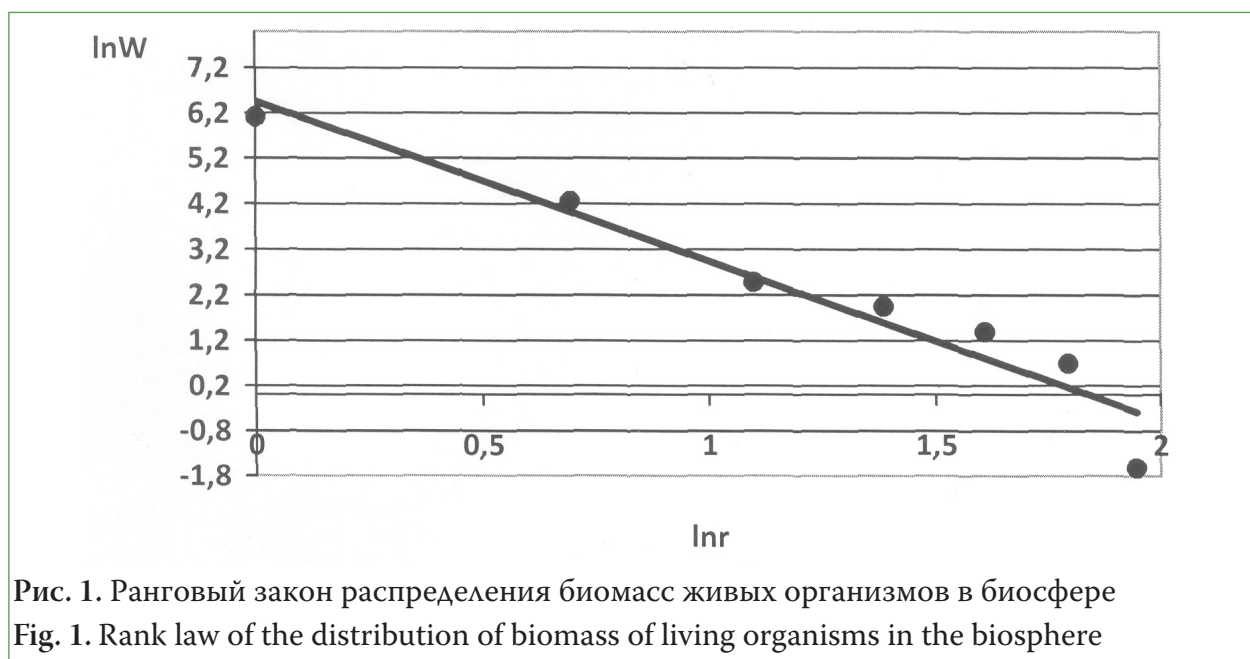


Рис. 1. Ранговый закон распределения биомасс живых организмов в биосфере  
Fig. 1. Rank law of the distribution of biomass of living organisms in the biosphere

отмечен в использованном нами первоисточнике (Bar-On et al. 2018).

Резюмируя вышеприведенное, приходим к выводу, что в настоящее время биосфера характеризуется как находящаяся в устойчивом состоянии. Это совпадает с мнением Т. И. Моисеенко: «Антропогенные преобразования среды обитания и экосистем в большинстве случаев носят

пока локальные и региональные проявления. Глобальные биогеохимические циклы пока сбалансированы регуляторным потенциалом экосистем и биосферы в целом. В процессе эволюционного развития выработаны у организмов механизмы поддержания гомеостаза, популяций — поддержания численности, экосистем — сохранения стабильности» (Моисеенко 2017).

### Литература

- Булгаков, Н. Г., Левич, А. П. (2005) Описание, происхождение и применение ранговых распределений в экологии сообществ. *Вестник Московского университета. Сер. 16. Биология*, № 1, с. 18–24.
- Буховец, А. Г. (2005) Системный подход и ранговые распределения в задачах классификации. *Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление*. № 1, с. 130–142.
- Гнатюк, В. И. (2005) *Закон оптимального построения техноценозов*. М.: Томский государственный университет, Центр системных исследований, 383 с. (Ценологические исследования. Вып. 29).
- Кудрин, Б. И. (1993) *Введение в технетуку*. 2-е изд. Томск: Изд. ТГУ, 552 с.
- Лебедева, Н. В. (сост.). (2002) *География и мониторинг биоразнообразия*. М.: Изд. Научного и учебно-методического центра, 432 с.
- Левич, А. П. (1980) *Структура экологических сообществ*. М.: МГУ, 182 с.
- Макарова, Н. В., Трофимец, В. Я. (2002) *Статистика в Excel*. М.: Финансы и статистика, 364 с.
- Моисеенко, Т. И. (2017) Эволюция биогеохимических циклов в современных условиях антропогенных нагрузок: пределы воздействий. *Геохимия*, № 10, с. 841–862. DOI: 10.7868/S0016752517100089
- Орлов, Ю. К. (1996) Динамика ранговых распределений и проблемы статистики большого числа редких событий. В кн.: *Математическое описание ценозов и закономерности технетуки. Философия и становление технетуки*. Абакан: Центр системных исследований, с. 79–93. (Ценологические исследования. Вып. 1–2).
- Петров, В. М., Яблонский, А. И. (1980) *Математика и социальные процессы. (Гиперболические распределения и их применение)*. М.: Знание, 64 с.
- Пузаченко, Ю. Г. (2016) Ранговые распределения в экологии и неэкстенсивная статистическая механика. В кн.: И. Я. Павлинов (сост.). *Сборник трудов Зоологического музея МГУ им. М. В. Ломоносова. Т. 54*. М.: Товарищество научных изданий КМК, с. 42–71.
- Пуштин, С. Л. (2010) *Ценология — это просто*. М.: Технетика, 68 с. (Ценологические исследования. Вып. 45).
- Степановских, А. С. (2001) *Экология: Учебник для вузов*. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 703 с.
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., Milo, R. (2018) The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 115, no. 25, pp. 6506–6511. DOI: 10.1073/pnas.1711842115

### References

- Bar-On, Y. M., Phillips, R., Milo, R. (2018) The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 115, no. 25, pp. 6506–6511. DOI: 10.1073/pnas.1711842115 (In English)
- Bukhovets, A. G. (2005) Sistemnyj podkhod i rangovye raspredeleniya v zadachakh klassifikatsii [Systematic approach and rank distributions in classification problems]. *Vestnik VGU. Seriya: Ekonomika i upravlenie — Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management*, no. 1, pp. 130–142. (In Russian)
- Bulgakov, N. G., Levich, A. P. (2005) Opisaniye, proiskhozhdenie i primeneniye rangovykh raspredelenij v ekologii soobshchestv [Description, origin and using of rank distribution in the ecology of communities]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 16. Biologiya — Herald of Moscow University. Series 16. Biology*, no. 1, pp. 18–24. (In Russian)
- Gnatyuk, V. I. (2005) *Zakon optimal'nogo postroyeniya tekhnotsenozov [The law of optimal construction of technocenoses]*. Moscow: Tomsk State University, Tsentr sistemnykh issledovaniy Publ., 383 p. (Tsenologicheskie issledovaniya [Cenological studies]. Vol. 29). (In Russian)

- Kudrin, B. I. (1993) *Vvedeniye v tekhnnetiku [Introduction to technetics]*. 2<sup>nd</sup> ed. Tomsk: Tomsk State University Publ., 552 p. (In Russian)
- Lebedeva, N. V. (comp.). (2002) *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya [Geography and biodiversity monitoring]*. Moscow: Nauchnyj i uchebno-metodicheskij tsentr Publ., 432 p. (In Russian)
- Levich, A. P. (1980) *Struktura ekologicheskikh soobshchestv [Ecological community structure]*. Moscow: Moscow State University Publ., 182 p. (In Russian)
- Makarova, N. V., Trofimets, V. Ya. (2002) *Statistika v Excel [Statistics in Excel]*. Moscow: Finansy i statistika Publ., 364 p. (In Russian)
- Moiseenko, T. I. (2017) Evolyutsiya biogeokhimicheskikh tsiklov v sovremennykh usloviyakh antropogennykh nagruzok: predely vozdeystviy [Evolution of biogeochemical cycles under anthropogenic loads: Limits impacts]. *Geokhimiya*, no. 10, pp. 841–862. DOI: 10.7868/S0016752517100089 (In Russian)
- Orlov, Yu. K. (1996) Dinamika rangovykh raspredeleniy i problemy statistiki bol'shogo chisla redkikh sobytiiy [The dynamics of rank distributions and statistics problems of a large number of rare events]. In: *Matematicheskoye opisaniye tsenozov i zakonomernosti tekhnnetiki. Filosofiya i stanovleniye tekhnnetiki [Mathematical description of cenoses and patterns of technetics. Philosophy and the formation of technetics]*. Abakan: Tsentr sistemnykh issledovaniy Publ., pp. 79–93. (Tsenologicheskie issledovaniya [Cenological studies]. Vol. 1–2). (In Russian)
- Petrov, V. M., Yablonskiy, A. I. (1980) *Matematika i sotsial'nyye protsessy. (Giperbolicheskiye raspredeleniya i ikh primeneniye) [Mathematics and social processes. (Hyperbolic distributions and their application)]*. Moscow: Znaniye Publ., 64 p. (In Russian)
- Pushchin, S. L. (2010) *Tsenologiya — eto prosto [Cenology is simple]*. Moscow: Tekhnnetika Publ., 68 p. (Tsenologicheskie issledovaniya [Cenological studies]. Vol. 45). (In Russian)
- Puzachenko, Yu. G. (2016) Rangovye raspredeleniya v ekologii i neekstensivnaya statisticheskaya mekhanika [Rank distributions in ecology and non-extensive statistical mechanics]. In: I. Ya. Pavlinov (comp.). *Sbornik trudov Zoologicheskogo muzeya MGU im. M. V. Lomonosova [Archives of Zoological Museum of Moscow State University]*. Vol. 54. Moscow: KMK Scientific Press, pp. 42–71. (In Russian)
- Stepanovskikh, A. S. (2001) *Ekologiya: Uchebnyk dlya vuzov [Ecology: Textbook for universities]*. Moscow: YUNITI-DANA Publ., 703 p. (In Russian)

**Для цитирования:** Фрумин, Г. Т., Болотова, Н. Л. (2020) К вопросу распределения живых организмов в биосфере. *Амурский зоологический журнал*, т. XII, № 3, с. 339–344. DOI: 10.33910/2686-9519-2020-12-3-339-344

**Получена** 15 мая 2020; прошла рецензирование 2 июня 2020; принята 12 июня 2020.

**For citation:** Frumin, G. T., Bolotova, N. L. (2020) On the issue of the distribution of living organisms in the biosphere. *Amurian Zoological Journal*, vol. XII, no. 3, pp. 339–344. DOI: 10.33910/2686-9519-2020-12-3-339-344

**Received** 15 May 2020; reviewed 2 June 2020; accepted 12 June 2020.