

ИНДЕКСНЫЙ МЕТОД, СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ПАРАЗИТОЛОГИИ

Никонорова В.Г.

*Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д.К. Беляева,
Иваново, e-mail: bgnikon@gmail.com*

Паразитология – комплексная наука, сформировавшаяся на стыке биологии, экологии, медицины, ветеринарии и сельскохозяйственных наук. В её методологии превалирует индексный метод, который включает в себя экстенсивность инвазии, интенсивность инвазии, индекс обилия, индекс Шеннона, индекс Бриллюэна, индексы Жаккара, индекс Сёрнсена, индекс сезонности. В работе раскрыта сущность указанных индексов, а также приведены данные о преимущественно биномиальном распределении первичных данных в паразитологии. Как следствие, показана необходимость использования непараметрических методов оценки достоверности различия двух выборок. Продемонстрирована значимая роль рядов динамики и способов их статистической оценки – корреляционного, регрессионного и кластерного анализов. Выделены экзогенные факторы, формирующие трендовую и периодическую составляющую в изменениях индексов паразитарных систем. Кратко освещены основные математические модели паразитарных систем. Продемонстрированы типовые недочеты при статистическом представлении результатов исследования, такие как использование амплитуды абсолютных значений вместо средних значений и стандартного отклонения изучаемых параметров, использование t-критерия Стьюдента без проверки соответствия распределения первичных нормальному. Продемонстрирована перспективность внедрения методов непараметрического и регрессионного анализа, для прогнозирования состояния паразитарных систем, как альтернатива широко распространенному качественному прогнозированию.

Ключевые слова: паразиты, прогноз, математическая модель, корреляция, методы

INDEX METHOD, STATISTICAL METHODS AND MATHEMATICAL MODELS IN PARASITOLOGY

Nikonorova V.G.

Ivanovo State Agricultural Academy named after D.K. Belyaev, Ivanovo, e-mail: bgnikon@gmail.com

Parasitology is a complex science formed at the intersection of biology, ecology, medicine, veterinary medicine and agricultural sciences. In her methodology, the index method prevails, which includes the extensiveness of the invasion, the intensity of the invasion, the abundance index, the Shannon index, the Brillouin index, Jaccard indexes, the Serens index, and the seasonality index. The paper reveals the essence of these indices, as well as provides data on the predominantly binomial distribution of primary data in parasitology. As a consequence, the necessity of using nonparametric methods for assessing the reliability of the difference between two samples is shown. The significant role of the series of dynamics and the methods of their statistical evaluation – correlation, regression and cluster analyzes – has been demonstrated. The exogenous factors that form the trend and periodic component in the changes in the indices of parasitic systems are identified. The main mathematical models of parasitic systems are briefly highlighted. Typical shortcomings in the statistical presentation of research results are demonstrated, such as the use of the amplitude of absolute values instead of the mean values and standard deviation of the studied parameters, the use of Student's t-test without checking the correspondence of the primary distribution to the normal. The prospects of introducing methods of nonparametric and regression analysis for predicting the state of parasitic systems as an alternative to widespread qualitative forecasting are demonstrated.

Keywords: blight, forecast, mathematical model, correlation, methods

Паразитология – комплексная наука, включающая в себя биологическую компоненту – исследующую фундаментальные закономерности паразитизма, медицинскую – описывающую взаимоотношения паразита и человека, ветеринарную – исследующую паразитов домашних и сельскохозяйственных животных, агрономическую, или фитопатологию – изучает паразитов растений, и экологическую компоненту – описывающую взаимодействия организмов паразитов между собой и с их средой обитания, включающей климатические и географические факторы. Это отразилось на методологии паразитологии, впитавшей в себя математические и статистические подходы,

характерные для вышеописанных дисциплин, и дополнившей её специфическими приемами. Однако в большинстве работ паразитология выступает в качестве прикладной дисциплины, в которой наибольшей популярностью пользуется индексный метод.

Экстенсивность инвазии ЭИ (Prevalence) – процент хозяев, зараженных одним паразитом или группой [1–3]:

$$\text{ЭИ} = N_p/n \times 100\% \quad (1)$$

Однако в том случае, когда в качестве зараженных хозяев выступают люди, принято использовать эпидемиологические показатели – количество случаев на 100 тысяч населения [4].

Интенсивность инвазии ИИ (Intensity) – среднеарифметический показатель числа паразитов, приходящихся на одну зараженную особь хозяина [3; 5]:

$$\text{ИИ} = \text{Par} / \text{Np}, \quad (2)$$

где Par – число выявленных паразитов у Np зараженных хозяев. Полученные результаты для удобства восприятия могут быть представлены в форме полук количественных данных, + – слабая интенсивность инвазии; ++ – средняя; +++ – сильная интенсивность инвазии [5]. Достаточно часто вместо среднего значения представляют амплитуду ИИ [6], что значительно затрудняет оценку достоверности полученных результатов и сравнение данных, полученных в разных исследованиях.

Индекс обилия ИО (Abundance) – среднее значение количества особей выбранного одного или нескольких видов паразитов у всех особей хозяина, включая незараженных [1; 2]:

$$\text{ИО} = \text{Par} / n, \quad (3)$$

где Par – количество выявленных паразитов у n обследованных животных.

Отдельно стоит проблема оценки достоверности различия двух индексов. В классических работах предлагаются следующие формулы. Критерий достоверности разностей двух оценок ЭИ (Федоров, 1986):

$$t_{\text{dif}} = (P_1 - P_2) / \sqrt{(M_{p1}^2 + M_{p2}^2)};$$

$$MP = \sqrt{(P(100 - P) / n)}, \quad (4)$$

где P_1, P_2 – сравниваемые ЭИ, %; M_{p1}, M_{p2} – их ошибки; n – число исследованных хозяев.

Критерий достоверности различия показателей ИО рассчитывается по формуле П.В. Терентьева и Н.С. Ростовской (1977):

$$t = (X_1 - X_2) / F; F = \sqrt{(S_1^2 (n - 1) +$$

$$+ S_2^2 (n - 1) / (n_1 + n_2 - 2)) * \sqrt{(n_1 + n_2) / (n_1 n_2)}, \quad (5)$$

где X_1, X_2 – сравниваемые показатели ИО; S_1^2, S_2^2 – их среднеквадратические отклонения; n_1, n_2 – размеры сравниваемых выборок (число исследованных хозяев). Полученные величины сравниваются с табличными, из таблицы распределения Стьюдента $t(\alpha, df)$ (обычно при уровне значимости $\alpha = 0,05$) при числе степеней свободы ($df = n - 2$).

Однако представленные критерии неудобны для использования, поэтому в большинстве работ они отсутствуют [1; 5; 6]. По-видимому, это объясняется их громоздкостью и широким внедрением автоматизированных методов определения достоверности отличия двух выборок, реализованных в электронных таблицах Excel [1; 7], пакете

программ Statistica [1; 8] и др. Их место, как правило, занимает t-критерий Стьюдента. Впрочем, его использование, также не всегда оправданно, поскольку требует проверки соответствия распределения изучаемой выборки нормальному. Однако существуют данные о том, что в большинстве случаев распределение гельминтов в популяции описывается биномиальным распределением или его предельным случаем распределением Пуассона–Борткевича. Это определяет необходимость использования непараметрических методов оценки достоверности различия двух выборок, таких как F-критерий Фишера [8] или критерий согласия Пирсона χ^2 [9].

Влияние биологической и экологической компоненты обусловило включение в методологию паразитологии следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Бриллюэна (HВ), индексы Жаккара для качественных (CJa) и количественных данных (IJ) (индекс Серенсена) [1; 2; 10].

Индекс Шеннона представляет собой меру хаоса, энтропии. Последняя будет максимальной, когда все события (S) будут иметь одинаковую вероятность наступления ($p_i = 1/S$) (Лебедева и др., 1999):

$$H' = -\sum p_i \ln p_i, \quad (6)$$

где p_i – доля гельминтов i-го вида.

Причины ошибок в использовании этого индекса чаще всего заключаются в том, что авторы включают наблюдаемые или исследуемые виды, а не все их существующее в природе разнообразие. Таким образом, количество i в разных исследованиях может быть совершенно разным, а полученные результаты – несопоставимыми для разных исследований, или даже некорректными в случае искусственного исключения из рассмотрения какого-либо вида паразита. Особенностью этого индекса является то, что его распределение соответствует нормальному, что позволяет использовать методы параметрической статистики, дисперсионный анализ и t-критерий Стьюдента [11].

Индекс Бриллюэна (HВ) также используется для оценки качества экосистемы, однако при оценке одного и того же массива первичных данных он принимает более низкие значения, чем H. Это связано с тем, что в нем нет неопределенности, свойственной индексу Шеннона. В связи с этим HВ рекомендуется использовать при оценке коллекции.

$$\text{HВ} = (\ln N! - \sum \ln n_i!) / N, \quad (7)$$

где N – количество в сообществе особей всех видов; n_i – количество особей вида i; ! – знак факториала.

В паразитологии Н и НВ дополняют друг друга. Посредством Н характеризуют разнообразие компонентного паразитарного сообщества (паразитарное сообщество популяции хозяина), а НВ – разнообразие инфрасообщества (паразитарное сообщество у отдельной особи хозяина). Иногда встречается полуколичественный способ оценивания видового разнообразия, в баллах [12].

Близость видового состава паразитов и их обилия можно оценить с помощью индексов Жаккара для качественных (СJa) и количественных данных (IJ):

$$C Ja = j/(a + b + j), \quad (8)$$

где j – число общих видов на обоих участках; а – число видов на участке А; b – число видов на участке В (Мэгарран, 1992).

$$I_j(j, k) = \sum \min(n_{ij}, n_{ik}) / \sum \max(n_{ij}, n_{ik}), \quad (9)$$

где n_{ij} – количество i-го вида в сообществе j; n_{ik} – количество i-го вида в сообществе k. Полученные значения индексов Жаккара могут быть положены в основу кластерного анализа, для построения дендрограмм сходства, которые позволяют выявлять группы, близость параметров которых обусловлена общностью физиологических процессов [13].

Доминирование отдельных видов в сообществе гельминтов определяется с помощью индекса доминирования Ковнацки (D) [14]:

$$D_i = 100 \times p_i \times N_i / N_s, \quad (10)$$

где p_i – встречаемость; $p_i = m_i / M_i$, m_i – число проб, в которых был найден вид i гельминтов, M – общее число проб, N_i – число особей i-го вида гельминтов, N_s – общее число особей в биоценозе. Группы доминирования гельминтов: 100–10 – доминанты; 10–1 – субдоминанты; 1–0,001 – адоминанты.

Также встречаются такие индексы, как среднее число паразитов на 1 кг массы, количество живых и мертвых личинок, которое может быть выражено некачественно, в баллах [6].

Индекс сезонности позволяет дать количественную оценку сезонных колебаний и показывает, на сколько процентов изучаемое явление больше или меньше среднегодового уровня. Сезонный характер животноводческого производства, связь цикла развития паразитов с климатическими факторами настойчиво диктует необходимость работы с динамическими рядами данных. Существует достаточно большое количество способов рассчитать индексы сезонности, построенных на усреднении отклонений исходных уровней ряда динамики от каких-либо эталонных значений:

средней, медианы, теоретических значений тренда и т.д. Из всего многообразия можно выделить два способа расчета индекса сезонности I_s [15]. Первый ориентирован на ряды динамики, не имеющие тренда. Он построен на определении отклонений усредненных значений для каждой временной точки (квартала, месяца, недели) от средней величины.

$$I_s = y\bar{t} / \bar{y} * 100\%, \quad (11)$$

где $y\bar{t}$ – среднее значение одноименных месяцев (кварталов); $\bar{y}$ – среднее значение уровней ряда динамики.

Второй метод расчета индекса сезонности подходит для динамических рядов, содержащих в себе тенденцию, на фоне которой происходят отклонения. Он основан на расчете среднего значения из соотношений эмпирических и теоретических уровней ряда динамики:

$$I_s = \sum (Y_i / Y_{ti}) / n * 100\%, \quad (12)$$

где Y_i – эмпирические значения для каждой временной точки ряда; Y_{ti} – теоретические значения, полученные по уравнению тренда; n – количество временных точек.

Учитывая частое использование динамических рядов, большую пользу может принести определение коэффициента корреляции, который в работах чаще всего представлен коэффициентом корреляции Пирсона (r) [7; 16]. Ранговые коэффициенты корреляции применяются значительно реже [10], однако использование их предпочтительнее, поскольку они позволяют описывать взаимодействие не только количественных первичных данных, но и полуколичественных, баллов и индексов, часто применяемых в паразитологии. Очевидная трудность в интерпретации большого численного массива коэффициентов корреляции может быть успешно решена при помощи использования метода корреляционных плеяд [17].

Выявление тренда [10; 18] в рядах индексов или первичных данных является эффективным способом выявления общей тенденции, что особенно полезно при широком видовом составе гельминтов и их промежуточных хозяев. Однако это методика, являющаяся частным случаем регрессионного анализа, исследующего влияния одной или нескольких независимых переменных на зависимую переменную. Использование его методов позволяет не только сглаживать флуктуации исследуемых параметров, но и выявлять взаимосвязи между ними, характер этих связей, что в свою очередь позволяет математически прогнозировать состояние паразитарных систем в зави-

симости от внешних факторов, например температуры [19] или осадков [20]. Полный список экзогенных факторов, влияющих на прогноз состояния паразитарных систем, более широкий и включает в себя [21]:

1. Сведения о климате и орографии местности хозяйства, численности и технологии содержания животных, их возрастных группах, пастбищеобороте.

2. Характеристика пастбищ.

3. Диагноз гельминтоза, вид возбудителя, моно- или полиинвазия.

4. Эпизоотология — возникновение, течение, сезонная и возрастная динамики.

5. Биология промежуточных и дополнительных хозяев (моллюсков, почвенных клещей, муравьев и т.п.).

6. Метеорологические показатели в течение выпасного периода — осадки, температура, инсоляция.

Возможность прогнозирования состояния паразитарных систем оказалась настолько заманчивой, что обусловила ряд публикаций по прогнозу того или иного гельминтоза. К сожалению, большинство из этих прогнозов носят качественный характер, без привлечения математического или статистического аппарата, что, безусловно, снижает их ценность [22–24]. Гораздо привлекательнее выглядит количественный алгоритм, базирующийся на точных математических данных [25].

Специальных знаний требует использование разработанных для экологических исследований математических моделей систем уравнений, разработанных для экологических исследований, таких как модель МакКормика/Кендрика [26], модель Никольсона-Бейли [27] и другие [28].

К сожалению, в ряде паразитологических исследований результаты представлены только абсолютным количеством наблюдаемых случаев и их долей в 100% наблюдений [29–31]. Часто вместо средней и её ошибки используется диапазон — минимальные и максимальные значения параметра [3; 32], что снижает сопоставимость результатов, полученных разными авторами, так как требует учета распределения и объема исследуемой выборки.

Безусловно, полноценное использование метода индексов, статистического и математического аппарата позволит не только обогатить полученные результаты исследования, сделать их более релевантными, но и обеспечить сопоставимость результатов разных авторов.

Список литературы

1. Кириллова Н.Ю., Кириллов А.А. Влияние пола хозяина на структуру сообществ гельминтов воробьеобразных

(Passeriformes) птиц // Российский паразитологический журнал. 2017. Т. 42. Вып. 4. С. 345–353.

2. Куклин В.В. Бургомистр (*Larus hyperboreus* Gunnerus, 1767) Баренцева моря: обзор гельминтофауны и возможность использования в качестве индикатора паразитологической ситуации // Российский паразитологический журнал. 2017. Т. 41. Вып. 3. С. 226–235.

3. Василевич Ф.И., Каплич В.М., Якубовский М.В., Бахур О.В. Ассоциативные гельминтозы и протозоозы диких парнокопытных животных северной лесостепной подзоны Беларуси // Российский паразитологический журнал. 2017. Т. 41. Вып. 3. С. 246–248.

4. Марцев А.А., Рудакова В.М. Ретроспективный анализ эпидемиологической обстановки по паразитарным заболеваниям во Владимирской области // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97. № 9. С. 825–830. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-825-830.

5. Биттиров А.М., Иттиев А.Б., Казанчев М.Х., Мирзоева Н.М., Курманова М.К. Биоразнообразие паразитарного комплекса рыб бассейна р. Терек // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2009. № 1. С. 62–66.

6. Белькевич И.А. Зараженность мышечных тканей морской рыбы разных видов личинками цестоды *Nybelinia surmenicola* // Российский ветеринарный журнал. 2017. № 1. С. 14–16.

7. Лунева Н.А., Понамарев Н.М. Внутривидовые взаимоотношения гельминтов *Dirofilaria immitis* // Вестник алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 7(117). С. 103–106.

8. Ханбекова Е.Н., Рубцова Л.Е., Бабин Ю.Ю., Елаткин Л.П., Лаврухин Д.К., Третьяков А.В., Спрыгин А.В. Поражение медоносной пчелы *Apis mellifera caucasica* Gorb. вирусами и паразитами и состояние пчелиных семей в разных эколого-географических условиях большого Кавказа // Сельскохозяйственная биология. 2013. № 6. С. 43–54.

9. Криштоп В.В., Румянцев Т.А., Пахрова О.А. Влияние состояния высшей нервной деятельности и пола на выживаемость при моделировании тотальной гипоксии головного мозга у крыс // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=22431> (дата обращения: 23.07.2020).

10. Дугаров Ж.Н., Пронин Н.М. Динамика сообществ паразитов в возрастном ряду Байкальского омуля *Coregonus migratorius* (Georgi, 1775) // Известия РАН. Серия Биологическая. 2013. № 5. С. 592–604.

11. Аниканова В.С., Бугмырин С.В., Иешко Е.П. Методы сбора и изучения гельминтов мелких млекопитающих: учебное пособие. Петрозаводск, 2017. 130 с.

12. Батжиев А.М. Состав, структура, показатели биоразнообразия и зоогеографические особенности териофауны Терского Кавказа в пределах Ингушетии и Чечни // История и философия естествознания. Рефлексия. 2015. № 3. С. 3–16.

13. Криштоп В.В. Кластерный анализ как метод комплексной оценки в сравнительной характеристике влияния статической и динамической нагрузки на сосудисто-паренхиматозные отношения в щитовидной железе // Успехи современного естествознания. 2005. № 4. С. 31–32.

14. Баканов А.И. Количественная оценка доминирования в экологических сообществах. Борок. 1987. Деп. в ВИНТИ 08.12.87. № 8593–В87. 64 с.

15. Дарда Е.С. Индексный метод в количественной оценке сезонных колебаний производства продукции животноводства // Статистика и вызовы современности: Всероссийская научно-практическая конференция. М., 2015. С. 128–132.

16. Ратынская И.А., Шлычков А.В., Егорова С.Ю., Калинин С.А., Инина Е.А. Хронический описторхоз и хроническая обструктивная болезнь лёгких: клинико-патогенетические особенности ассоциированной патологии //

Известия Челябинского научного центра. 2004. Вып. 2 (23). С. 193–197.

17. Криштоп В.В., Пахрова О.А. Применение кластерного и корреляционного анализа для оценки гемореологических показателей у больных эссенциальной артериальной гипертензией // Успехи современного естествознания. 2014. № 9–2. С. 11–16.

18. Бобырева Н.С., Корнеева Я.А., Дегтева Г.Н. Анализ заболеваемости паразитогами в Ненецком автономном округе // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 2. С. 157–162. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-2-157-162.

19. Глазунова Н.Н., Безгина Ю.А., Устимов Д.В. Математическое моделирование изменения численности популяции злаковых тлей и её энтомофагов (паразитов и хищников) в разные периоды онтогенеза озимой пшеницы и погодноклиматических факторов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=11479> (дата обращения: 22.07.2020).

20. Пузанова Е.В. Прогноз эпизоотической ситуации по основным гельминтозам сельскохозяйственных животных в Российской Федерации на 2019 год // Российский паразитологический журнал. 2019. Т. 13. № 2. С. 28–35. DOI: 10.31016/1998-8435-2019-13-2-28-35.

21. Никитин В.Ф. О методах прогнозирования пастбищных гельминтозов // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2018. № 19. С. 341–342.

22. Колесников В.И., Сорокин В.В. Прогнозирование эпизоотий гельминтозов // Сборник научных трудов Ставропольского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства. 2010. Т. 3. № 1. С. 111–113.

23. Маклакова Л.П. Опыт разработки методов прогнозирования и профилактики гельминтозов диких копытных // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2019. № 13. С. 233–235.

24. Горохов В.В., Самойловская Н.А., Пешков Р.А. Эпизоотической ситуации в Российской Федерации по ос-

новным гельминтозам на 2014 год // Российский паразитологический журнал. 2014. № 2. С. 32–33.

25. Гайрабекова Т.И., Гайрабеков Р.Х. Алгоритм прогнозирования фасциолезной инвазии // Успехи современной науки. 2016. № 9. Т. 12. С. 74–76.

26. Герасимов А.М. Математические модели-системы «паразит-хозяин»: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва, 2009. 44 с.

27. Голубев А.В., Денисова Н.Б., Рубцов В.В. Модели паразит-хозяин для принятия решений о целесообразности биологической борьбы // Вестник Московского государственного университета леса – лесной вестник. 2013. № 3. С. 59–60.

28. Недорезов Л.В. Об оценке влияния качества корма и паразитизма на циклические колебания серой лиственничной листовёртки // Евразийский энтомологический журнал 2007. Т. 6. № 2. С. 229–244.

29. Махамат Нгуерабе Ямтитина, Бан-Бо Бебанто Антипас, Макаров В.В. Заболеваемость крупного рогатого скота сибирской язвой в республике Чад // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2017. Т. 12. № 4. С. 368–373. DOI: 10.22363/2312-797X-2017-12-4-368-373.

30. Синяков М.П., Стогначёва Г.А., Солейчук Н.Д. Особенности морфо-биологической характеристики оксиуридов, симптоматики и диагностики болезни // Животноводство и ветеринарная медицина. 2020. № 1. С. 40–44.

31. Терентьева З. Х., Пятачкова Е.П. Разнообразие паразитов животных при послеубойном осмотре // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 2. С. 175–178.

32. Орлова И.И., Белоусова И.Н., Буренок А.С., Глазкова Е.В. Результаты мониторинга паразитарной ситуации на особо охраняемых природных территориях Центрального региона России (2014–2016 гг.) // Российский паразитологический журнал. 2017. № 2. С. 139–145.