

Научная статья

УДК 519.246.5

doi: 10.17223/19988605/72/10

Устранение мешающего параметра при обработке наблюдений за посещениями животными определенных точек или районов при анализе биоразнообразия**Гурами Шалвович Цициашвили¹, Владимир Николаевич Бочарников²**¹ *Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*² *Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*¹ *guram@iam.dvo.ru*² *vbocharnikov@mail.ru*

Аннотация. Строятся оценки биоразнообразия в экосистемах по наблюдениям за перемещениями различных видов животных с помощью фотоловушек, по следам животных и с помощью БПЛА. В основу оценки биоразнообразия положена мера Шеннона (энтропия). При обработке наблюдений за моментами подходов животных к фотоловушкам, пересечениями некоторых маршрутов и образованием следов возникает необходимость учета ошибок наблюдения, вызванных неточностью работы приборов или учета, метеорологическими и другими факторами. Это приводит к необходимости использования модели пуассоновского потока с «закрашиванием» некоторых точек, построения неравенства Чебышева для различных функций от наблюдения и устранения из наблюдений мешающих параметров, вызванных неточностями измерения. С помощью сочетания этих методов удастся оценить вероятность присутствия в экосистеме отдельных видов животных и функции энтропии по этим оценкам. Доказывается сходимость по вероятности построенных оценок при увеличении времени наблюдения (устремлении к бесконечности).

Ключевые слова: мешающий параметр; пуассоновский поток; закрашивание точек потока; неравенство Чебышева.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИПМ ДВО РАН № 075-00459-25-00.

Для цитирования: Цициашвили Г.Ш., Бочарников В.Н. Устранение мешающего параметра при обработке наблюдений за посещениями животными определенных точек или районов при анализе биоразнообразия // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 72. С. 101–106. doi: 10.17223/19988605/72/10

Original article

doi: 10.17223/19988605/72/10

Elimination of an interfering parameter when processing observations of animal visits to certain points or areas in the analysis of biodiversity**Gurami Sh. Tsitsiashvili¹, Vladimir N. Bocharnikov²**¹ *Institute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*² *Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*¹ *guram@iam.dvo.ru*² *vbocharnikov@mail.ru*

Abstract. The paper focuses on constructing estimates of biodiversity in ecosystems based on observations of the movements of various species of animals using camera traps, animal tracks and using UAVs. The assessment of biodiversity is basing on the Shannon measure (entropy). When processing observations of the moments when animals approach camera traps, the intersections of some routes and the formation of tracks, it becomes necessary to take into account observation errors caused by inaccuracies in the operation of instruments or metering, meteorological and other factors. This leads to the need to use the Poisson flow model with "coloring over" some points, to construct Chebyshev's inequality for various functions from observations, and eliminate interfering parameters from observations caused

by measurement inaccuracies. Using a combination of these methods, it is possible to estimate the probability of the presence of individual animal species in the ecosystem and the entropy function according to these estimates. The convergence in probability of the constructed estimates is proving with increasing observation time (tending towards infinity).

Keywords: interfering parameter; Poisson flow; coloring of flow points; Chebyshev inequality.

Acknowledgments: The study was supported within the framework of the state assignment of the IPM Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences No. 075-00459-25-00.

For citation: Tsitsiashvili, G.Sh., Bocharnikov, V.N. (2025) Elimination of an interfering parameter when processing observations of animal visits to certain points or areas in the analysis of biodiversity. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 72. pp. 101–106. doi: 10.17223/19988605/72/10

Введение

В научных исследованиях последнего времени большое внимание уделяется разработке новых методов обработки данных наблюдений за перемещениями животных, их фиксации в определенных местах [1]. Такие наблюдения за животными и следами их жизнедеятельности проводятся непосредственно людьми, например учеты следов животных по снегу, или дистанционно, фиксацией зверей с помощью фотоловушек (фотокапканов) [2, 3], в том числе и с использованием БПЛА [4, 5]. Выполненные математические расчеты позволяют рассчитывать вероятность ограничений и избирательность фиксации следов жизнедеятельности или самих животных при количественных оценках относительной численности зверей в пределах определенной территории. Представляется необходимым ввести алгоритм расчетов вероятности обнаружения следов и самих животных в рекомендации для пользования сотрудниками особо охраняемых природных территорий, в охотничьих хозяйствах и при проведении полевых исследований зоологами.

Принципиальной особенностью всех видов учетов диких животных является невозможность полной фиксации и точного определения всех существующих следов животных. Причины этого разнообразны, они зависят и могут быть вызваны погодными условиями, особенностью природных ландшафтов, не имеющих снежного покрова, ограниченностью четкой видимости при фиксации с воздуха, а также физической невозможностью людей организовать учеты всех следов жизнедеятельности и тем более самих животных на обширных российских пространствах в природе. К другой группе ошибок наблюдений можно отнести технические ошибки, вызванные несовершенством работы дистанционных средств. Так, ограниченный ресурс батарей, плохие погодные условия, ограниченный обзор фотоловушек [6] не позволяют зафиксировать все подходы животных к фотоловушкам. Общим следствием вышеперечисленного является то, что для математических расчетов мы должны принять условие, что наблюдения лишь с какой-то вероятностью могут фиксировать присутствие животных в определенных точках, там, где установлены приборы. Более точная оценка такой вероятности обычно затруднительна, следовательно, при расчетах данное обстоятельство следует рассматривать как мешающий параметр, который при обработке наблюдений следует каким-то образом устранить.

Такая постановка вопроса требует определения характеристик, которые после устранения мешающего параметра можно оценить. Оказывается, имеется целый перечень подобных характеристик, к числу которых в первую очередь можно отнести соотношение между наблюдениями в различные моменты времени, в различных точках наблюдения или участках территории. Например, для определения мешающих параметров удобно воспользоваться моделью пуассоновского потока точек, которые могут наблюдаться или не наблюдаться из-за ошибок наблюдения с некоторой неизвестной вероятностью. Наряду с этими характеристиками, определяющими пропорцию между разными наблюдениями, возникают характеристики типа корреляций между указанными наблюдениями и событиями в экологических системах. Наконец, очень важную роль играют характеристики разнообразия в экосистеме, которые также основываются на описанных неточных наблюдениях и требуют устранения мешающих параметров, характеризующих неточность наблюдений. Для работы с такими наблюдениями есте-

ственно воспользоваться теоремой о раскрашивании точек пуассоновского потока [7]. Наряду с этим имеется большая группа статей, посвященных устранению мешающих параметров в различных наблюдениях [8–12].

Все такие исследования в экологических задачах тесно связаны с одной очень важной биологической задачей оценки биоразнообразия в экосистемах. Этой задаче посвящено большое количество работ как статистических [13–16], так и биологических и экологических [17–19]. Здесь основным показателем биоразнообразия выступает мера Шеннона [13] (энтропия). В данной работе приводится серия прикладных экологических задач, при решении которых можно устранить мешающий параметр, сохранив основные характеристики экосистемы. Делается заключение о том, что необходимо таким образом проводить математическую обработку наблюдений, чтобы устранить этот мешающий параметр. Предлагается в качестве математического инструмента работы с неточными наблюдениями, характеризующими вероятность обнаружения следа или присутствия животных в определенных точках или в определенных областях территории, использовать модель пуассоновского потока точек на временной оси или в областях некоторой территории.

Основные результаты

Скажем, что случайная функция $A(T)$ при $T \rightarrow \infty$ сходится по вероятности к числу a , если для $\forall \varepsilon > 0 \exists T(\varepsilon): \forall T > T(\varepsilon)$ выполняется неравенство $P(|A(T) - a| > \varepsilon) < \varepsilon$. Пусть $n(T)$ – количество точек пуассоновского потока интенсивности $\lambda, 0 < \lambda < \infty$, на отрезке $[0, T]$, тогда имеет место сходимость по вероятности:

$$n(T)T \xrightarrow{P} \lambda, T \rightarrow \infty. \quad (1)$$

Это утверждение следует из очевидного неравенства

$$P(|n(T)T - \lambda| > \varepsilon) \leq Dn(T)T^2\varepsilon^2 = \lambda T\varepsilon^2 \rightarrow 0, T \rightarrow \infty. \quad (2)$$

Перечислим свойства сходимости по вероятности, которыми будем пользоваться.

A. Если случайная функция $A(T)$ при $T \rightarrow \infty$ сходится по вероятности к числу a , то $kA(T)$ при вещественном $k \neq 0$ сходится по вероятности к ka ,

B. Если случайные функции $A_i(T), i = 1, \dots, m$, при $T \rightarrow \infty$ сходятся по вероятности к числам a_i , то сумма $\sum_{i=1}^m A_i(T)$ сходится по вероятности к сумме $\sum_{i=1}^m a_i$.

C. Если случайные функции $A(T), B(T)$ при $T \rightarrow \infty$ сходятся по вероятности к числам a, b , то произведение $A(T)B(T)$ сходится по вероятности к ab . Если дополнительно потребовать $b \neq 0$, то $A(T)/B(T)$ сходится по вероятности к a/b .

D. Если случайная функция $A(T)$ при $T \rightarrow \infty$ сходится по вероятности к числу $a, 0 < a < 1$, то $\ln A(T)$ сходится по вероятности к $\ln a$.

Доказательства этих свойств основаны на использовании неравенства Чебышева подобно неравенству (2). Например, для доказательств свойств A, B, C, D при $k \neq 0, 0 < \varepsilon < \min(a, b) \leq \max(a, b) < 1$ строятся неравенства

$$P(|kA(T) - ka| > \varepsilon) = P\left(|A(T) - a| > \frac{\varepsilon}{|k|}\right), \quad (3)$$

$$P(a - \varepsilon \leq A(T) \leq a + \varepsilon, b - \varepsilon \leq B(T) \leq b + \varepsilon) \leq P(a + b - 2\varepsilon \leq A(T) + B(T) \leq a + b + 2\varepsilon), \quad (4)$$

$$P(a - \varepsilon \leq A(T) \leq a + \varepsilon, b - \varepsilon \leq B(T) \leq b + \varepsilon) \leq P(a - \varepsilon)(b - \varepsilon) \leq A(T)B(T) \leq (a + \varepsilon)(b + \varepsilon), \quad (5)$$

$$P(a - \varepsilon \leq A(T) \leq a + \varepsilon, b - \varepsilon \leq B(T) \leq b + \varepsilon) \leq P\left(\frac{a - \varepsilon}{b + \varepsilon} \leq \frac{A(T)}{B(T)} \leq \frac{a + \varepsilon}{b - \varepsilon}\right), \quad (6)$$

$$P(a - \varepsilon \leq A(T) \leq a + \varepsilon) = P(\ln(a - \varepsilon) \leq \ln A(T) \leq \ln(a + \varepsilon)) = \quad (7)$$

$$= P\left(\ln a + \ln\left(1 - \frac{\varepsilon}{a}\right) \leq \ln A(T) \leq \ln a + \ln\left(1 + \frac{\varepsilon}{a}\right)\right).$$

Эти неравенства позволяют определить в каждом случае величину $T(\varepsilon)$, входящую в понятие сходимости по вероятности. Причем входящие в них слагаемые, или сомножители, или числители и знаменатели не предполагаются независимыми.

Пусть $n_j(t)$ – количество точек пуассоновского потока интенсивности λ_j , $j = 1, \dots, J$. Полагаем, что все эти J потоков независимы. Каждая точка потока j с вероятностью c_j фиксируется прибором j . Причем каждая точка потока j независимо от фиксации прибором относится к типу $i = 1, \dots, I$ с вероятностью p_i , $0 < p_i < 1$, $\sum_{i=1}^I p_i = 1$. Здесь прибор типа j может быть фотоловушкой, или определять след животного на снегу, или фиксироваться каким-либо другим прибором. А типы точек потоков соответствуют видам животных, подходящих к приборам.

Пусть теперь n_{ji} – количество точек потока j фиксируемого прибором j и принадлежащего к типу i . Используя свойства A, B , получаем сходимость по вероятности

$$\frac{n_{ji}(T)}{T} \rightarrow c_j \Lambda_j p_i, \quad T \rightarrow \infty, \quad j = 1, \dots, J, \quad i = 1, \dots, I$$

и, значит, сходимости по вероятности

$$\sum_{j=1}^J \frac{n_{ji}(T)}{T} \rightarrow p_i \sum_{j=1}^J c_j \Lambda_j, \quad T \rightarrow \infty, \quad i = 1, \dots, I.$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^J \frac{n_{ji}(T)}{T} \rightarrow \sum_{i=1}^m p_i \sum_{j=1}^J c_j \Lambda_j = \sum_{j=1}^J c_j \Lambda_j, \quad T \rightarrow \infty.$$

Отсюда с помощью свойства C получаем сходимость по вероятности

$$\bar{p}_i = \frac{\sum_{j=1}^J n_{ji}(T)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^J n_{ji}(T)} \rightarrow p_i, \quad T \rightarrow \infty, \quad i = 1, \dots, I. \quad (8)$$

Из этого, используя свойства A, B, C, D , получаем, что при $T \rightarrow \infty$ оценка энтропии $\bar{S}$ сходится по вероятности к энтропии S , т.е.

$$\bar{S} = -\sum_{i=1}^I \bar{p}_i \ln \bar{p}_i \xrightarrow{P} S = -\sum_{i=1}^I p_i \ln p_i.$$

Заключение

Полученные в работе результаты основаны на оценке вероятностей p_i , $i = 1, \dots, m$, принадлежности наблюдений различным видам животных. Это является основой для построения оценки энтропии, характеризующей биоразнообразия экосистемы. Но сами эти вероятности также являются важными характеристиками экосистемы, и их можно использовать для различных биологических прогнозов. Все построенные оценки основаны на понятии сходимости по вероятности. Скорость этой сходимости можно оценивать с помощью неравенства Чебышева, точность которого определяется приведенными в работе неравенствами (3)–(6).

Список источников

- Музыка С.М., Сутугина И.М. Возможности изучения среды обитания животных на основе цифровой обработки данных дистанционного зондирования Земли в программном комплексе «Photomod» // Аграрное образование и наука. 2021. № 3. С. 5–16.

2. Петров Т.А., Максимова Д.А., Марченкова Т.В., Дарман Ю.А. Оценка состояния популяционных группировок копытных животных заповедника «Кедровая падь» на основании данных фотомониторинга // *Экосистемы*. 2022. № 30. С. 138–150.
3. Огурцов С.С., Волков В.П., Желтухин А.С. Обзор современных способов хранения, обработки и анализа данных с фотоловушек в зоологических исследованиях // *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. 2017. № 2(1). С. 73–98.
4. Кашницкий А.В. Технология создания инструментов обработки и анализа данных больших распределенных спутниковых архивов // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. № 29 (9). С. 772–777. doi: 10.15372/AOO20160908
5. Греков О.А. Организация и проведение авиаучета охотничьих животных с использованием беспилотных авиационных систем самолетного и вертолетного типов // *Информация и космос*. 2017. № 4. С. 111–119.
6. Ефремов В.А., Зуев В.А., Леус А.В., Мангазеев Д.И., Радыш А.С., Холодник И.В. Формирование регистраций животных на основе постобработки данных фотоловушек // *Экосистемы*. 2023. № 34. С. 51–58.
7. Кингман Дж. Пуассоновские процессы. М. : МЦНМО, 2007. 136 с.
8. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М. : Мир, 1978. 560 с.
9. Young G.A., Smith R.L. *Essentials of Statistical Inference*. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 236 p. (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics; no. 16).
10. Bernardo J.M., Smith A.F.M. *Bayesian Theory*. London : John Wiley and Sons, 2000. xiv, 586 p. (Wiley series in probability and mathematical statistics).
11. Wackerly D., Mendenhall W., Scheaffer R.L. *Mathematical Statistics with Applications*. Pacific Grove, CA : Duxbury, 2014. xvi, 853 p.
12. Холево А.С. Вероятностные и статистические аспекты квантовой теории. М. : МЦНМО, 2020. 296 с.
13. Shannon C.E. A mathematical theory of communication // *Bell System Technical Journal*. 1948. V. 27. P. 379–423.
14. Renyi A. On measures of entropy and information // *Proc. 4th Symp. Math. Statist. Probabil.* 1961. P. 547–561.
15. Magurran A.E. *Measuring Biological Diversity*. Oxford : Blackwell Publ., 2004. 260 p.
16. Бродский А.К. Биоразнообразие: учебник. М. : Академия, 2012. 207 с.
17. Яшина Т.В. Индикаторы оценки биоразнообразия на особо охраняемых природных территориях Алтае-Саянского экорегиона : руководство по использованию. Красноярск, 2011. 56 с.
18. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием. Тольятти : Кассандра, 2013. 314 с.
19. Денисенко С.Г. Информационная мера Шеннона и ее применение в оценках биоразнообразия (на примере морского зообентоса). Морские беспозвоночные Арктики, Антарктики и Субантарктики // *Исследования фауны морей*. 2006. Т. 56 (64). С. 35–46.

References

1. Muzyka, S.M. & Sutugina, I.M. (2021) The possibilities of studying the animal habitat based on digital processing of Earth remote sensing data in a software package “Photomod.” *Agrarnoe obrazovanie i nauka*. 3. pp. 5–16.
2. Petrov, T.A., Maksimova, D.A., Marchenkova, T.V. & Darman Yu.A. (2022) Assessment of the state of population groups of ungulates of the Kedrovaya Pad reserve based on photomonitoring data. *Ekosistemy*. 30. pp. 138–150.
3. Ogurtsov, S.S., Volkov, V.P. & Zheltukhin, A.S. (2017) Review of modern methods of storing, processing and analyzing data from camera traps in zoological research. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*. 2(1). pp. 73–98.
4. Kashnitskiy, A.V. (2016) Tekhnologiya sozdaniya instrumentov obrabotki i analiza dannykh bol'shikh raspredelennykh sputnikovyykh arkhivov [Technology for creating tools for processing and analyzing data from large distributed satellite archives]. *Optika atmosfery i okeana*. 29(9). pp. 772–777. DOI: 10.15372/AOO20160908
5. Grekov, O.A. (2017) Organization and conduct of aerial surveys of hunting animals using unmanned aircraft systems of aircraft and helicopter types. *Informatsiya i kosmos*. 4. pp. 111–119.
6. Efremov, V.A., Zuev, V.A., Leus, A.V., Mangazeev, D.I., Radysh, A.S. & Kholodnyak, I.V. (2023) Formirovanieregistratsiy zhiivotnykh na osnove postobrabotki dannykh fotolovushek [Formation of animal registrations based on post-processing of camera trap data]. *Ekosistemy*. 34. pp. 51–58.
7. Kingman, J. (2007) *Puassonovskie protsessy* [Poisson processes]. Translated from English. Moscow: MTSNMO.
8. Cox, D. & Hinckley, D. (1978) *Teoreticheskaya statistika* [Theoretical Statistics]. Translated from English. Moscow: Mir.
9. Young, G.A. & Smith, R.L. (2005) *Essentials of Statistical Inference*. Cambridge: Cambridge University Press.
10. Bernardo, J.M. & Smith, A.F.M. (2000) *Bayesian Theory*. London: John Wiley and Sons.
11. Wackerly, D., Mendenhall, W. & Scheaffer, R.L. (2014) *Mathematical Statistics with Applications*. Pacific Grove, CA: Duxbury.
12. Kholevo, A.S. (2020) *Veroyatnostnye i statisticheskie aspekty kvantovoy teorii* [Probabilistic and Statistical Aspects of Quantum Theory]. Moscow: MTsNMO.
13. Shannon, C.E. (1948) A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 27. pp. 379–423.
14. Renyi, A. (1961) On measures of entropy and information. *Proc. 4th Symp. Math. Statist. Probabil.* pp. 547–561.
15. Magurran, A.E. (2004) *Measuring Biological Diversity*. 2nd ed. Oxford: Blackwell.
16. Brodsky, A.K. (2012) *Bioraznoobrazie* [Biodiversity]. Moscow: Akademiya.
17. Yashina, T.V. (2011) *Indikatory otsenki bioraznoobraziya na osobo okhranyaemykh prirodnnykh territoriyakh Altae-Sayanskogo ekoregiona. Rukovodstvo po ispol'zovaniyu* [Indicators of biodiversity assessment in specially protected natural territories of the Altai-Sayan ecoregion. User's guide]. Krasnoyarsk: [s.n.].

18. Shitikov, V.K. & Rosenberg, G.S. (2013) *Randomizatsiya i butstrep: statisticheskiy analiz v biologii i ekologii s ispol'zovaniem* [Randomization and bootstrap: Statistical analysis in biology and ecology using]. Tolyatti: Kassandra.
19. Denisenko, S.G. (2006) The Shannon information measure and its application in biodiversity assessments (using the example of marine zoobenthos). *Marine invertebrates of the Arctic, Antarctic and Subantarctic. Issledovaniya fauny morey*. 56(64). pp. 35–46.

Информация об авторах:

Цициашвили Гурами Шалвович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук (Владивосток, Россия). E-mail: guram@iam.dvo.ru
Бочарников Владимир Николаевич – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Владивосток, Россия). E-mail: vbocharnikov@mail.ru

Вклад авторов: Цициашвили Г.Ш. построил вероятностные модели и оценки их параметров. Бочарников В.Н. дал детальное описание работы фотоловушек при наблюдениях за животными, неразличимыми по снимкам, и сформулировал содержательную задачу обработки этих данных.

Information about the authors:

Tsitsiashvili Gurami Sh. (Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Main Researcher of Institute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation) E-mail: guram@iam.dvo.ru
Bocharnikov Vladimir N. (Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of Institute of Pacific Ocean Geography Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation). E-mail: vbocharnikov@mail.ru

Contribution of the authors: Tsitsiashvili G.Sh. built probabilistic models and estimates of their parameters. Bocharnikov V.N. gave a detailed description of the work of camera traps when observing animals indistinguishable from images and formulated a meaningful task of processing these data.

Поступила в редакцию 12.03.2025; принята к публикации 02.09.2025

Received 12.03.2025; accepted for publication 02.09.2025