



УДК 504.75; 311.2

**М. И. Богачев, А. Р. Каюмов,
О. А. Маркелов, С. Ю. Шевченко**

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА*

Рассмотрены вопросы представления данных метеорологического, гидрологического и экологического характера в геоинформационных системах. Показано, что благодаря выявленным универсальным статистическим свойствам ряда климатических и экологических индикаторов представляется возможным оптимизировать пространственно-временное представление данных с использованием комбинированных математических моделей, отражающих как регулярные сезонные колебания индикаторов, так и описывающих статистические свойства флуктуаций относительно типичных значений. Дополнительным преимуществом рассмотренного подхода является повышенная устойчивость предложенных моделей к нарушению целостности данных.

Геоинформационные системы, экологический мониторинг, сезонные колебания, интервальные статистики выбросов, свойство масштабируемости, универсальные закономерности

Современные тенденции развития систем экологического мониторинга характеризуются переходом к комплексным геоинформационным системам, на которые возложены функции не только сбора, хранения и систематизации данных, но и их комплексной обработки, включая создание формально-математических моделей динамики основных экологических индикаторов, а также решение задач прогнозирования состояния окружающей среды. С ростом объема данных, доступных для обработки, как в пространственном, так и во временном ключе, становятся актуальными вопросы разграничения (идентификации) естественных сезонных климатических колебаний и трендов климатических изменений. Исследования в данном направлении в последние годы активно ведутся рядом ведущих мировых исследовательских центров (см., напр., [1]).

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о присутствии долговременной зависимости (ДВЗ) в колебаниях большинства основных метеорологических индикаторов, например температуры и влажности воздуха, частоты и количества осадков, уров-

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (соглашение № 14.В37.21.0160).

ня воды в естественных водоемах и ряде других [2]. Присутствие такой зависимости означает, что колебания указанных факторов неживой природы, а следовательно, и связанные с ними изменения в экосистеме могут носить в том числе и естественный характер, а не быть обусловленными факторами антропогенной нагрузки. В этом случае данные зависимости укладываются в общую модель медленных долговременных изменений. Это затрудняет задачу различения естественных колебаний параметров экосистемы и их изменений вследствие антропогенной нагрузки, которые в ряде случаев могут стать необратимыми [3].

Последнее обстоятельство обуславливает актуальность использования в интегрированных системах экологического мониторинга математических моделей естественных флуктуаций основных метеорологических данных, отклонения от которых могут являться индикаторами неблагополучия в экосистеме. При этом важным является выявление уровней колебаний наблюдаемых показателей, которые по статистическим данным могут быть отнесены к естественным – в приведенном примере, выражаясь математическим языком, вписываются в квазистационарную математическую модель ДВЗ-процесса. Напротив, статистически значимо выпадающие из этой модели данные, с высокой вероятностью, свидетельствуют о влиянии внешних неблагоприятных факторов, которые наиболее часто относятся к антропогенному воздействию на экосистему. Серьезным ограничением здесь часто становится неполнота доступных данных, их малая длительность и/или недостаточное временное и пространственное разрешение [4].

В этой связи актуально применение масштабно-инвариантных математических моделей, в которых целевые показатели после соответствующей нормировки подчиняются универсальным для относительно широкого диапазона климатических условий закономерностям [5]. При этом районированию подлежат только отдельные нормировочные показатели (как правило, среднемесячные или среднесезонные значения, а также их среднеквадратические отклонения), которые легко получить из доступных статистических источников с достаточно высокой точностью. Универсальность данных показателей применительно к колебаниям температуры, количества и интенсивности осадков, а также уровня воды естественных водоемов была недавно показана в ряде работ [6]–[9]. Подобные свойства значительно упрощают формализацию математических моделей и уменьшают требования к объемам статистики наблюдаемых данных для решения задач прогнозирования. Поскольку данные показатели являются одними из основных природных факторов, непосредственно влияющими на экосистему, есть основания полагать, что аналогичные зависимости могут быть получены и для показателей живой природы.

При рассмотрении математической модели наблюдаемых колебаний показателя x_i целесообразно изначально разделить типичные сезонные колебания s_i , которые удовлетворительно аппроксимируются детерминистической моделью, и флуктуации f_i относительно характерного сезонного тренда, которые могут быть описаны статистической моделью. Сезонный тренд определяется путем усреднения значений за текущую дату по всем годам наблюдения $s_i = \overline{x_{k(i)}}$, где i – номер отсчета в реализации, $k(i)$ – номер календарных суток в году. Поскольку s_i может быть удовлетворительно аппроксимировано детерминистической моделью, в дальнейшем мы сконцентрируемся на задаче описания флуктуаций f_i относительно s_i .

Репрезентативные фрагменты данных мониторинга некоторых метеорологических и гидрологических показателей длительностью 2 г. (730 сут) приведены на рис. 1, *а* – среднесуточные значения температуры атмосферного воздуха, °F (Прага, Чехия, 1995–1996 гг.); *б* – суммарные посуточные значения осадков, мм (Казань, Россия, 1881–1882 гг.) и *в* – суммарного потока воды в реке, м³/с (Вуокса, Финляндия, 1867–1868 гг.). Окружностями на рис. 1, *а–в* даны измеренные посуточные значения показателей x_i , сплошными черными кривыми среднесезонные значения s_i , полученные путем усреднения по всем годам измерения, а серым фоном среднеквадратические отклонения $\sigma(s_i)$, полученные при оценке среднесезонных значений. На рис. 1, *г–е* приведены значения флуктуационной составляющей f'_i , вычисленной как $f'_i = (x_i - s_i) / \sigma(s_i)$. Как было показано в ряде работ [1], [2], f'_i для многих данных естественного происхождения, в том числе и для данных метеорологического и гидрологического мониторинга, может быть удовлетворительно описано математическими моделями ДВЗ-процессов, в частности фрактальными моделями.

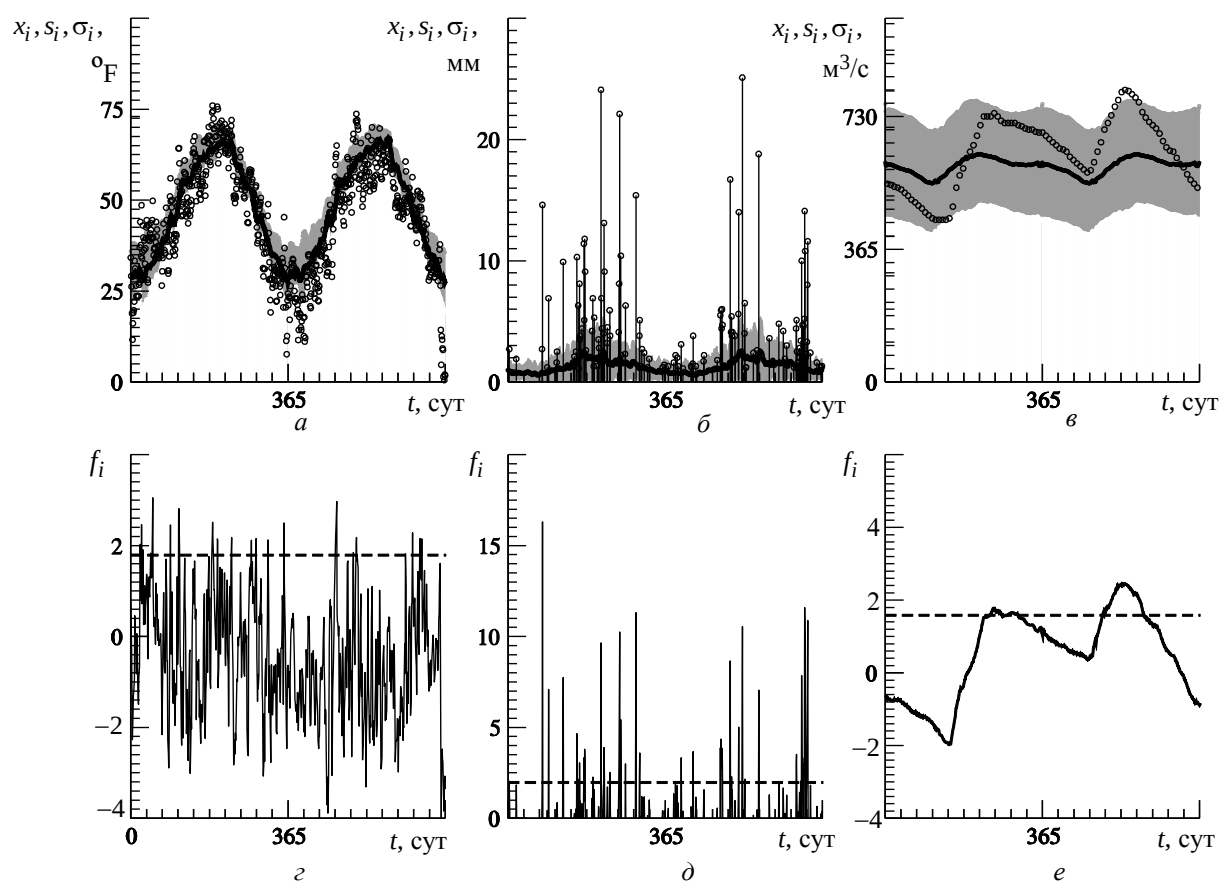


Рис. 1

Одной из актуальных задач математического моделирования метеорологических и гидрологических индикаторов в рамках экологического мониторинга является воспроизведение естественной регулярности выбросов данных, соответствующих температурным и гидрологическим аномалиям, которые могут привести к существенным изменениям в структуре эко-

системы. Примерами могут служить anomalно высокие или anomalно низкие температуры, засухи, выход из берегов рек и т. п. В этом случае математическая модель описывает ожидаемую регулярность данных явлений, что делает возможным выявление отклонений в экосистеме путем сравнительного анализа данных мониторинга с модельным прогнозом.

Горизонтальные штриховые линии на рис. 1, *з-е* иллюстрируют примеры порогов Q , превышения которых ассоциируются с существенным воздействием на экосистему. Для удобства математической формализации целесообразно перейти от описания значения порога к среднему интервалу R_Q между превышениями заданного порога, воспользовавшись взаимно однозначным соответствием между ними при фиксированном распределении данных.

Важными индикаторами, позволяющим оценивать регулярность и впоследствии прогнозировать выбросы по данным мониторинга, являются статистики интервалов r_i между выбросами $f'_i > Q$. Эффективность использования интервальных статистик для прогнозирования выбросов была показана в ряде работ (напр., [10], [11]).

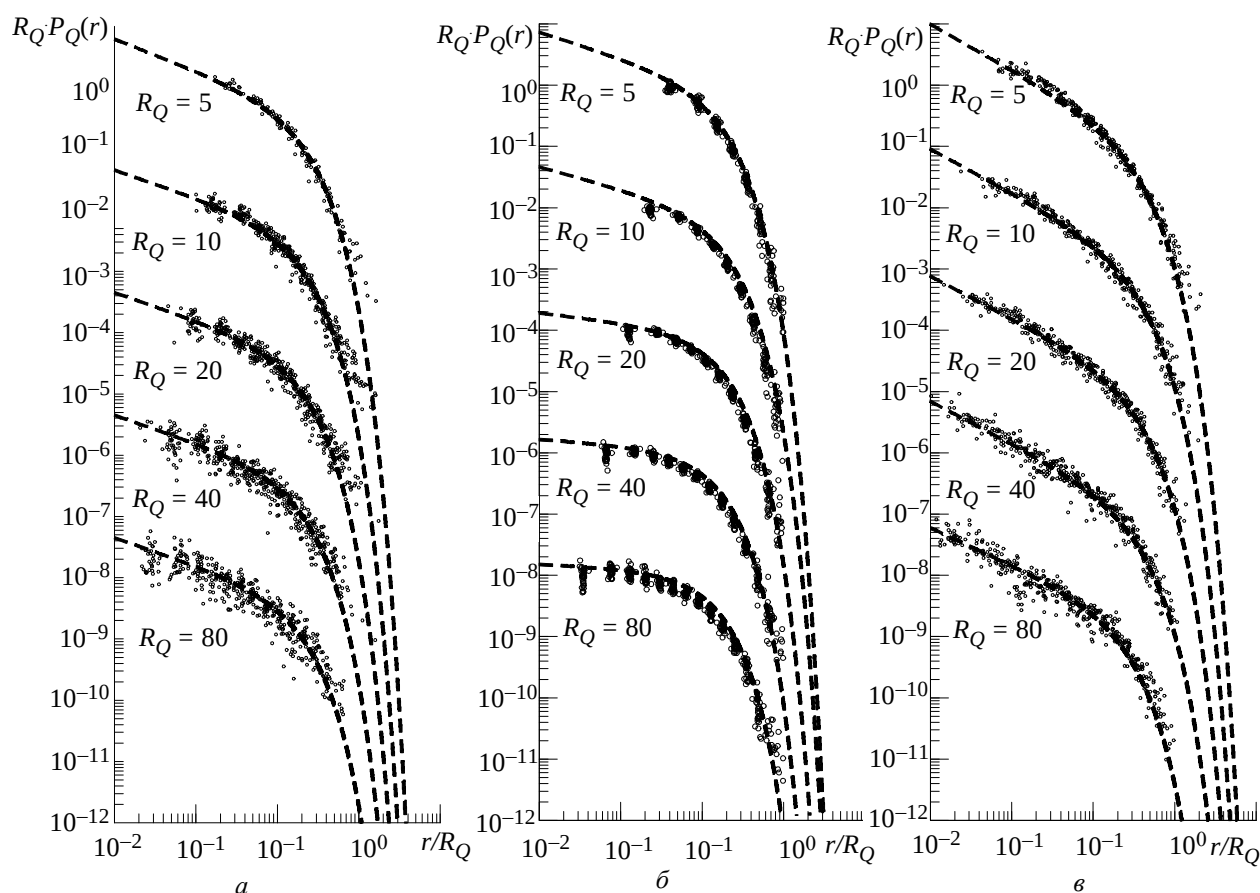


Рис. 2

На рис. 2 приведены плотности вероятности $P_Q(r > 1)$ интервалов (в сутках) между выбросами $f'_i > Q$ в единицах среднего интервала R_Q , домноженные на R_Q для соблюдения условия нормировки. Единичные интервалы в данной модели не рассматриваются, так как их динамика существенно различается в силу краткосрочной инерционности метеорологических

и особенно гидрологических процессов [8], [9]. На рис. 2 приведены указанные плотности вероятности: a – для температуры воздуха, b – для количества осадков, c – для потока воды в реках. Рандомизированные выборки из 30 реализаций для анализа были получены с использованием международных баз данных¹. Верхние графики на рис. 2, a – c были получены для значения $R_Q = 5$, ниже последовательно приведены графики для $R_Q = 10, 20, 40$ и 80 . Для удобства визуального восприятия каждый последующий график был опущен вниз на две декады, т. е. разделен на 100 по сравнению с предыдущим. Штриховые линии приводят результаты аппроксимации полученных плотностей вероятности гамма-распределением

$$P_Q(r) \propto \frac{1}{R_Q} \left[\frac{r}{R_Q} \right]^{\alpha(Q)-1} \exp \left[-\lambda(Q) \frac{r}{R_Q} \right], \text{ где } \alpha \text{ и } \lambda - \text{ аппроксимирующие коэффициенты,}$$

значения которых приведены в табл. 1. Данный вид аппроксимации для интервальных статистик метеорологических и гидрологических данных был впервые предложен в работе [12].

Таблица 1

Средний интервал	Температура		Количество осадков		Поток воды в реке	
	α	λ	α	λ	α	λ
$R_Q = 5$	0.49	0.67	0.58	0.85	0.25	0.40
$R_Q = 10$	0.52	0.70	0.64	0.85	0.31	0.43
$R_Q = 20$	0.55	0.70	0.85	0.85	0.31	0.43
$R_Q = 40$	0.55	0.73	0.88	0.91	0.34	0.46
$R_Q = 80$	0.55	0.73	0.94	0.97	0.40	0.55

Как видно из табл. 1, параметры аппроксимирующего гамма-распределения α и λ крайне слабо зависят от R_Q для температуры, однако более существенно изменяются для количества осадков, где распределение приближается к экспоненциальному при $\alpha, \lambda \rightarrow 1$ для больших значений R_Q и для потока воды в реках, от $\alpha \approx 1/4$ для малых значений R_Q до $\alpha \approx 2/5$ для больших значений R_Q . Зависимость $\alpha(Q)$ можно объяснить присутствием нелинейной составляющей ДВЗ в данных гидрологического мониторинга, которая приводит к различиям в статистических закономерностях появления выбросов данных различной амплитуды. Данные эффект подробно изучался с помощью математического моделирования в работах [5], [10]. Небольшое увеличение $\lambda(Q)$ с ростом Q можно объяснить статистическим эффектом снижения объема выборки интервалов с ростом значения R_Q для всех рассмотренных типов данных.

Использование универсальной математической модели позволяет эффективно оценивать ожидаемые метеорологические и гидрологические аномалии и ассоциированные с ними изменения в экосистеме на основании ограниченных данных, позволяющих достоверно оценить только их средние значения и среднеквадратические отклонения. Таким образом, предложенный подход позволяет существенно снизить требования к полноте данных предыдущих наблюдений по каждой анализируемой местности и повысить достоверность результатов экологического мониторинга и прогнозирования.

¹ Сайт Национального центра климатических данных (США) – <http://lwf.ncdc.noaa.gov/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology / Eds. J. Kropp, H. J. Schellnhuber. Berlin: Springer, 2011. 400 p.
2. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs // Trans. Am. Soc. Civil Eng. 1951. Vol. 116. P. 770.
3. On spurious and corrupted multifractality: The effects of additive noise, short-term memory and periodic trends / J. Ludescher, M. I. Bogachev, J. W. Kantelhardt et al. Amsterdam: Physica. Vol. 390. P. 2480–2490.
4. Богачев М. И. К вопросу об использовании долговременной зависимости при прогнозировании выбросов в системах метеорологического и гидрологического мониторинга // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 4. С. 45–53.
5. Bogachev M. I., Eichner J. F., Bunde A. On the Occurrence of Extreme Events in Long-term Correlated and Multifractal Data Sets // Pure and App. Geophys. Vol. 165. P. 1195–1207.
6. Andrade R. F. S., Schellnhuber H.-J., Clausen M. Analysis of rainfall records: possible relation to self-organized criticality. Amsterdam: Physica, 1998. Vol. 254. P. 557.
7. Universality of rain event size distributions / O. Peters, A. Deluca, A. Corral et al. // J. Stat. Mech. 2010. Vol. 11. P. 11030.
8. Bogachev M. I., Bunde A. Universal scaling in precipitation and river runoff // Europhys. Lett. 2012. Vol. 97. P. 48011(1–6).
9. Bunde A., Bogachev M. I., Lennartz S. Precipitation and river flow: Long-term memory and predictability of extreme events // Geophys. Monogr. Ser. Vol. 196. P. 139–152.
10. Bogachev M. I., Eichner J. F., Bunde A. Effect of nonlinear correlations on the statistics of return intervals in multifractal data sets // Phys. Rev. Lett. Vol. 99. 2007. P. 240601 (1–4).
11. Богачев М. И. К вопросу о прогнозируемости выбросов динамических рядов с фрактальными свойствами при использовании информации о линейной и нелинейной составляющих долговременной зависимости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. Вып. 5. 2009. С. 31–40.
12. Bogachev M. I., Bunde A. Return interval statistics in precipitation and river flow records // Proc. of the Eur. Geophys. Un. Gen. Assembly. 2009. Vol. 11. P. 13565.

M. I. Bogachev, A. R. Kayumov, O. A. Markelov, S. Yu. Shevchenko

ON THE OPTIMIZATION OF SPATIO-TEMPORAL DATA MINING IN ECOLOGICAL MONITORING GEOINFORMATION SYSTEMS

Meteorological, hydrological and ecological data representation in geoinformation systems is considered. It is shown that due to the recently obtained universal statistical laws in several climatic and ecological indicators, optimization of spatio-temporal data representation using combined mathematical models including regular seasonal trends as well as fluctuations around them is possible. An additional advantage of the proposed approach is its enhanced robustness under data incompleteness conditions.

Geoinformation systems, ecological monitoring, seasonal trends, extremes interval statistics, scaling properties, universal laws

УДК 612.76 616-001 617.3

Д. А. Рубашова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОГОВИЦЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТОНОМЕТРИИ

Построены три модели и проведены исследования напряжений и перемещений в капсуле глаза при компрессионной нагрузке. Модели реализованы в пакетах прикладных программ Solid Works, Cosmos Works. Исследовано влияние стадий развития кератоконуса и механических свойств роговицы на результаты измерения внутриглазного давления по методам Маклакова.

Кератоконус, тонометрия, внутриглазное давление

Существует несколько методов измерения внутриглазного давления (ВГД). В настоящее время самые широко применяемые методы: метод Маклакова и метод Гольдмана. Аппланационная нагрузка при измерении по методу Маклакова – 10 г (нагрузка, под давлением которой поверхность глазного яблока уплощается контактной поверхностью тонометра до определенного диаметра кружка сплющивания). При измерении ВГД по методу Гольдмана