

ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ОСАДКОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СУТОЧНОЙ ДИСКРЕТНОСТИ

В.Л. Посошков, А.В. Прусов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: vao@alpha.mhi.iuf.net

Рассмотрен метод моделирования атмосферных осадков суточной дискретности, основанный на представлении временных рядов в виде марковской цепи. Этим методом были сгенерированы временные ряды среднесуточных осадков (регион г. Севастополя), адекватные данным наблюдений и пригодные для моделирования климатической изменчивости речного стока.

Введение. Динамические модели взаимодействия между гидрологией подстилающей поверхности суши и погодой дают мощный инструмент для оценки эффекта вариаций климата на возможные последствия отклонений от нормы гидрологического цикла. Эти модели неизбежно требуют привлечения данных о погоде. Хотя можно использовать исторические ряды данных о погоде, получение длинных временных рядов является трудоемкой, дорогостоящей и порой невозможной задачей. Ключ к решению этой проблемы состоит в использовании стохастических генераторов погоды, которые способны давать синтетические ежесуточные ряды погоды со статистическими характеристиками, близкими к тем, что и в исторических данных. К настоящему времени было предложено несколько подходов для генерации рядов суточных осадков, температуры и солнечной радиации. Недавние обзоры обычно используемых генераторов можно найти в работах [1,2]. Событие дождя в данные сутки оказывает основное воздействие на относительную влажность, температуру и солнечную радиацию, и генератор погоды в первую очередь независимо генерирует осадки в данные сутки. Таким образом, основным блоком в стохастическом генераторе погоды выступает генератор осадков, который, используя информацию о процессе с большим временным масштабом, позволяет получить искусственные временные ряды

меньшей дискретности. Хотя эти модельные временные ряды могут и не давать истинную толщину слоя выпавших на землю осадков, их статистика похожа на статистику фактических временных рядов.

Настоящая работа фокусирует внимание на стохастической генерации рядов осадков в одиночном пункте (г. Севастополь). Калибровка модели проводится на фактических данных многолетних ежесуточных наблюдений за осадками.

Модель стохастического генератора осадков. В работе используется подход, базирующийся на авторегрессионной модели, введенной Ричардсоном [3]. Как и в этой ранней работе, в большинстве имеющихся моделей, генерирование осадков содержит две компоненты: 1) процесс чередования (последовательность сухих и влажных суток), и 2) процесс интенсивности (последовательность сумм осадков во влажных сутках). Влажные сутки определяются как те, в которые измеренное количество осадков превышает некоторое пороговое значение (у нас – 0,1 мм).

Простая модель перемежаемости (чередования, повторяемости) – это цепь Маркова с двумя состояниями. В марковском цепном процессе вероятность влажных (сухих) состояний в день t зависит только от состояния в день $t-1$. Здесь J_t определяется как случайная индикаторная переменная состояния для суток t : $J_t = 0$ если день t сухой; $J_t = 1$ для влажного дня. Эта модель характеризуется четырьмя вероятностями перехода:

$$p_{ij} = Pr\{J_t = j | J_{t-1} = i\} \quad i, j = 0, 1. \quad (1)$$

Поскольку вероятности перехода удовлетворяют условию $p_{00} + p_{01} = p_{10} + p_{11} = 1$, требуется лишь два параметра, чтобы определить марковский процесс с двумя состояниями, а именно

$$p_{01} = Pr\{\text{осадки в день } t | \text{без осадков в день } t-1\} \text{ и}$$

$$p_{11} = Pr\{\text{осадки в день } t | \text{осадки в день } t-1\}.$$

Было предложено множество статистических распределений для моделирования процесса интенсивности, иными словами,

распределения количества выпадающих осадков во влажные сутки. В данной работе используются два из них, которые с успехом применялись при оценках компонент речного стока с помощью пакета программ

SWAT (the Soil and Water Assessment Tool [4]).

1) *Асимметричное нормальное распределение* [5]. Количество осадков во влажных сутках вычисляется по формуле:

$$R_{day} = \mu_{month} + 2 \cdot \sigma_{month} \cdot \left\{ \frac{[(SND_{day} - \frac{g_{month}}{6}) \cdot (\frac{g_{month}}{6}) + 1]^3 - 1}{g_{month}} \right\}, \quad (2)$$

где: R_{day} - количество осадков в данные сутки, μ_{month} - среднесуточное количество осадков для данного месяца, σ_{month} - стандартное отклонение суточных осадков для данного месяца, SND_{day} - стандартное нор-

мальное отклонение, вычисленное для суток, g_{month} - коэффициент асимметрии для суточных осадков в данном месяце.

Среднесуточные осадки для месяца вычислялись так:

$$\mu_{month} = \frac{PCPMM}{PCPD}, \quad (3)$$

где $PCPMM$ - среднее количество осадков, выпавших за месяц, $PCPD$ - среднее число дней с осадками в месяце.

Стандартное нормальное отклонение SDN для суток вычисляется как:

$$SDN_{day} = \cos(6.283 \cdot rnd_2) \cdot \sqrt{-2 \ln(rnd_1)}, \quad (4)$$

где rnd_1 и rnd_2 - случайные числа из выборки с равномерным распределением в интервале [0,1].

2) *Экспоненциальное распределение* [6]. Это распределение придается как альтернатива асимметричному. При его использовании требуется меньше входных параметров, и оно преимущественно используется там, где доступны лишь ограниченные данные с событиями осадков. В этом случае количество осадков за сутки рассчитывается на основе экспоненциального распределения при помощи уравнения:

$$R_{day} = \mu_{mon} (-\ln(rnd_1))^{r_{exp}}, \quad (5)$$

где R_{day} - количество выпавших осадков в данные сутки, μ_{mon} - среднемесячная величина суточной суммы осадков во влажные сутки, rnd_1 - случайное число из равномерной выборки [0,1], а r_{exp} - экспоненциальный показатель, который имеет величину в интервале [1,2]. Тестирование этого уравнения по территории США показало, что величина $r_{exp}=1,3$ дает удовлетвори-

тельные результаты. В других регионах (в частности, в Украине) оптимальная величина параметра r_{exp} может отличаться от этого значения.

Итак, в данной работе используются два вида распределения осадков: Асимметричное нормальное, в соответствии с формулой (2), и экспоненциальное - формула (5). Соответствующие варианты генератора в дальнейшем будем называть "генератор 1" и «генератор 2». Процесс чередования сухих и влажных суток в обоих вариантах идентичен. Как только сутки определились как влажные, генератор рассчитывает суточную сумму осадков согласно формулам (2) или (5).

Тестирование моделей генератора.

Для испытания двух указанных вариантов модели генератора осадков использовались данные многолетних (1906-1995 г.г.) ежесуточных наблюдений за осадками в г. Севастополе. Так как в этих данных имеется продолжительный разрыв, приходящийся на годы Великой Отечественной войны, то использовалась часть временного ряда за послевоенный период. Сравним статистики климатических временных рядов

осадков суточной дискретности в Севастополе, синтезированные генератором и полученные из натуральных наблюдений.

Как указывалось выше, тестировались два вида генератора, условно названных как генератор 1 и генератор 2. Для работы первого генератора требуется максимальный набор входных параметров. С одной стороны, это позволяет максимально учесть статистические свойства процесса, что является несомненным преимуществом. С другой стороны, – надежные оценки этих параметров можно получить лишь из достаточно длинных массивов наблюдений, которые, как правило, не доступны. Преимущество

генератора 2 как раз видится в том, что для его работы требуется меньше исходной информации, что существенно для моделирования синтетических рядов осадков там, где эти данные отсутствуют.

В рамках концепции авторегрессионной цепи Маркова с двумя состояниями важными характеристиками процесса являются вероятности перехода p_{01} и p_{11} ($p(d/w)$ и $p(w/w)$ в другой нотации). Ввиду важности этих характеристик при моделировании синтетических рядов осадков на рисунке 1 приводятся их осредненные значения за каждый месяц года.

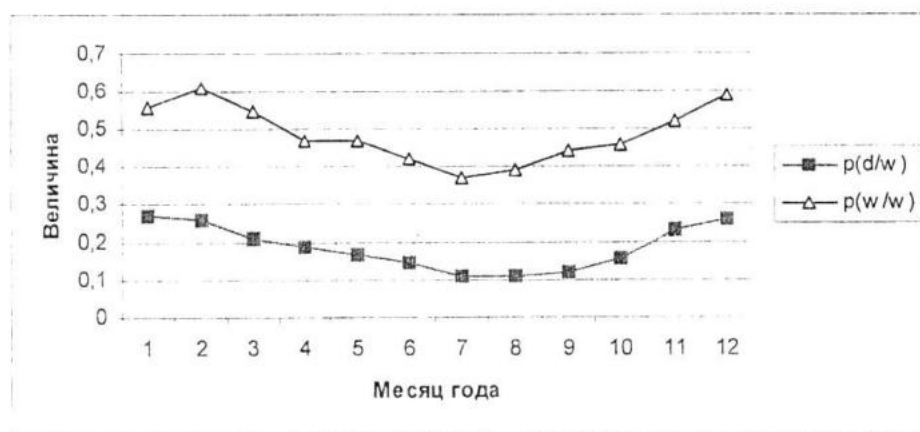


Рисунок 1 – Годовой ход вероятностей перехода

Совершенно логично, что вероятность выпадения осадков в определенный день существенно выше, если в предыдущие сутки также выпали осадки. Т.е. процесс выпадения осадков таков, что сухие и влажные события имеют тенденцию группироваться в серии, последовательности однотипных событий. Об этом, в частности, указывал еще Катц [7]. Максимальные значения вероятности перехода достигают в зимнее время, так как в этот период осадки порождаются крупномасштабными возмущениями атмосферной циркуляции, приходящими из Атлантики, и осадки преимущественно носят обложной характер. Минимальные значения достигаются в июле – августе, когда события осадков (преимущественно ливневые) порождаются возмущениями меньшего масштаба, приходящими из бассейнов Средиземного и Черного морей. В этот период осадки непродолжительны и события осадков в соседние сутки

в меньшей степени, чем зимой, связаны между собой.

Во многих гидрологических приложениях, например, при расчете водосбора рек, иногда решающее значение имеет величина слоя осадков, выпавших не за сутки, а за более длительный период, такой как месяц. Поэтому при оценке качества работы генератора осадков в первую очередь принимается во внимание его способность достаточно точно воспроизводить месячные суммы осадков.

На рисунке 2 приведен годовой ход выпавшего слоя осадков в Севастополе на основании месячных сумм, полученных из ежесуточных наблюдений за осадками, а также из временных рядов суточной дискретности с выхода различных модификаций генератора.

Видно, что оба генератора правильно описывают годовой ход с локальным усилением осадков в июне. Модификация ге-

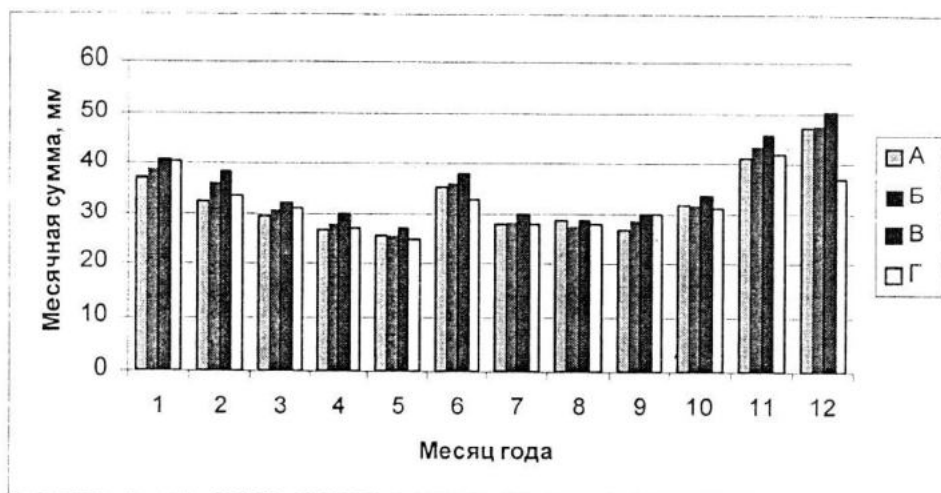


Рисунок 2 – Годовой ход осадков в Севастополе на основании наблюдений и моделирования. А – генератор-1; Б и В – генератор-2 с показателями экспоненты, равными соответственно 1,2 и 1,3; Г – наблюдения

нератора 2 с параметром $rexp=1,2$ (ген2а) лучше описывает годовой ход, чем классический вариант генератора с величиной показателя, равной 1,3. Нет принципиальных различий между генератором 1 и вариантом ген2а. Учитывая, что для последнего требуется меньшее число параметров, следует предпочесть его. В дальнейшем, всюду, где будет идти речь о генераторе 2, будет рассматриваться только эта его модификация с показателем экспоненты, равным 1,2.

На рисунке 3 показана внутригодовая изменчивость интенсивности осадков, т.е. средней величины осадков в каждом месяце года, приходящейся на влажные сутки. Как и на рисунке 2, кривые относятся к наблюдениям и выходам с различных моделей генератора.

Согласно фактическим наблюдениям, по уровню интенсивности осадков год условно можно разбить на 3 сезона. Зимне-весенний период январь – май (spring – в западной литературе). Характеризуется невысоким уровнем интенсивности примерно 3 мм в сутки. Летний период – это июнь – сентябрь. Характеризуется максимальной интенсивностью, приближающейся к 6 мм в сутки. Осенне-зимний период (fall) – это октябрь – декабрь. Характеризуется промежуточной величиной интенсивности осадков, равной примерно 4 мм в сутки. В целом для всех сезонов более пригоден генератор 2. Расхождения с наблюдениями в случае генератора 1 особенно заметны в августе. В среднем модельные величины

генератора 2 превышают наблюдаемые на величину менее 5 %.

Заключение. Как указывалось во введении, генераторы погоды и процедуры построения суточных данных по месячным полезны в случаях, когда не доступны данные о погоде, или когда в доступных данных разрешение по времени недостаточно для предстоящего моделирования. Этот аспект проблемы приобретает особое значение при исследованиях климатической зоны Украины, примыкающей к Черному морю, где плотность гидрометеорологической сети, обеспечивающей информацией о погоде, невелика.

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в моделировании динамических составляющих погоды, моделирование осадков все еще остается трудноразрешимой задачей. В данной работе предпринята попытка моделировать климатические ряды осадков суточного масштаба на основе генератора осадков, широко используемого на западе и входящего в качестве одной из компонент в проект SWAT. В модели генератора погоды SWAT используются два варианта генератора осадков. В обоих случаях используются параметрические распределения количества осадков в дождливые дни. В одном из них в наиболее полной мере учитываются статистические свойства осадков суточной дискретности в данном регионе, основанные на измерениях в прошлом. Для его работы, в частности, требуется знание дисперсии и асим-

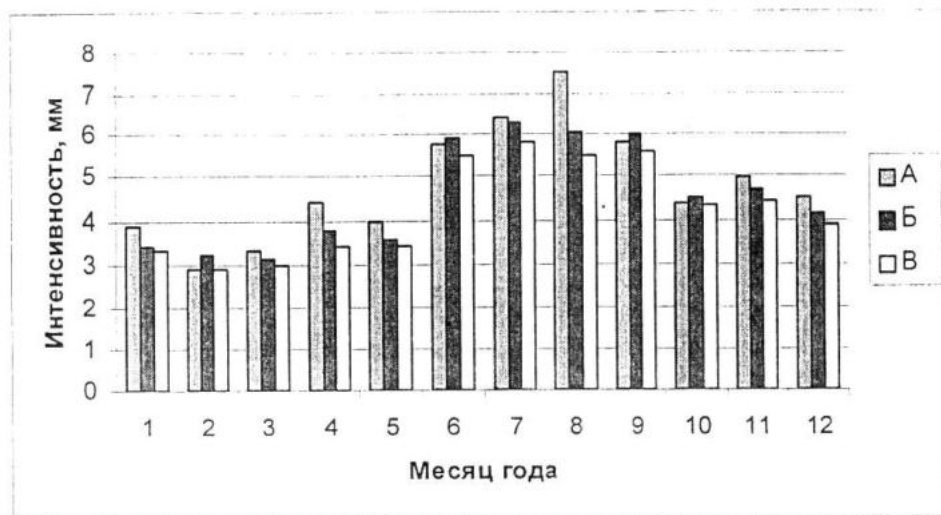


Рисунок 3 – Среднесуточная величина интенсивности осадков. А – генератор-1; Б – генератор-2 ($r_{exp}=1,2$); В – наблюдения

метрии процесса. Такая информация доступна лишь при наличии достаточно длинных рядов ежесуточных наблюдений за осадками. Таким образом, данный вариант генератора осадков по существу имеет ограниченное применение, например, для заполнения пропусков в имеющихся разрывных рядах наблюдений. Для работы второго варианта осадков требуется меньше входных параметров. В связи с этим он может получить более широкое применение в местах, где число натуральных наблюдений за осадками суточного масштаба ограничено.

В данной работе исследованы оба варианта генератора. Тестирование проводилось на экспериментальном материале по Севастополю. По ряду характеристик тестирование дало хорошие результаты. В большинстве случаев более адекватным представляется вариант генератора с экспоненциальным распределением интенсивности осадков, требующий меньше входных параметров. Подгонка показателя экспоненциального распределения осадков применительно к исследуемому региону показала, что значение показателя, принятое как оптимальное для региона Северной Америки, здесь менее приемлемо. Модельные ряды осадков для Севастополя более адекватны натурным рядам при величине экспоненциального показателя распределения, равной 1,2.

Моделирование климатических рядов осадков неограниченной длительности может найти широкое применение в комплексном исследовании гидрологического

цикла в бассейне речного стока Крыма, для тех мест, где недоступны натурные данные суточного масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.Л. Голубятников. Стохастическое моделирование величин ежедневных осадков и среднесуточных температур. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 40, № 5, 2004. – С. 665–677.
2. Dubrovsky, M., J. Buchhtele and Z. Zalud. High-Frequency and low-frequency variability in stochastic daily weather generator and its effect on agricultural and hydrologic modelling. *Climatic Change*, 63, 2004. – P. 145–179.
3. Richardson, C.W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour. Res.*, 17, 1981. – P. 182–190.
4. Arnold, J.G., and N. Fohrer. SWAT2000. Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrolog. Process.* 19(3), 2005. – P. 563–572.
5. Nicks, A.D. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. In *Proc. Symp. Statistical Hydrology*, Aug.-Sept. 1971. Tucson, AZ. U.S. Department of Agriculture, Misc. Publ. No. 1275. 1974. – P. 154–171.
6. Williams, J.R. Chapter 25. The EPIC Model. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch., 1995. – P. 909–1000.
7. Katz, R.W. Precipitation as a chain-dependent process. *J. Appl Meteorol.*, 16, 1977. – P. 671–676.