

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ОСАДКОВ К УСЛОВИЯМ КРЫМСКИХ ГОР

В.Л. Посошков, А.В. Прусов

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

В статье приводятся результаты моделирования временных рядов атмосферных осадков суточной дискретности для региона Ай-Петри (Крым). Использовался стохастический генератор осадков. Входные параметры модели получены на основе массива архивных данных. Статистические характеристики синтетических временных рядов близки к фактическим.

Целью данной работы является моделирование синтетических временных рядов суточных сумм атмосферных осадков в горном массиве Крыма (Ай-Петри). Этот пункт интересен тем, что, как и в Украинских Карпатах, здесь за счет горной орографии выпадает наибольшее количество осадков по сравнению с прилегающей местностью. По данным монографии [1] климатическая годовая сумма осадков на Ай-Петри достигает величины 1082 мм. Данные суточной дискретности для региона Крымских гор не всегда доступны. Вместе с тем здесь нередки случаи ливневых осадков разрушительной силы, достигающих в отдельные сутки интенсивности 20 мм, 30 мм и выше. Зарегистрирован случай (декабрь 1962 г.), когда суточная сумма выпавших осадков составила 215 мм [1]. Сильные ливневые дожди вносят существенный вклад в паводки и селевые потоки, поэтому моделирование статистики осадков в этом районе приобретает особое значение.

Моделирование проводилось с помощью генератора осадков Ричардсоновского типа [2], построенного на основе марковской цепи и описанного в статье [3] настоящего сборника. Параметры, необходимые для моделирования, определялись из массива непрерывных наблюдений за осадками суточной дискретности в горном районе Крыма Ай-Петри за период 1945-1976 гг.

Не вдаваясь в подробности, напомним основные свойства использованного гене-

ратора. Как и большинство генераторов этого типа, данная модель состоит из двух компонент: блока перемежаемости и блока интенсивности. Временной процесс выпадения осадков рассматривается как простая цепь Маркова с двумя состояниями. Одно состояние – это дни без осадков или с незначительным количеством осадков, другое – дни с количеством осадков, превышающим некоторый пороговый уровень (у нас – 0,1 мм). Состояние в данные сутки зависит только от состояния в сутки накануне. Степень связи между этими состояниями определяется параметрами P_{01} и P_{11} – вероятностями перехода соответственно «сухие–влажные» и «влажные–влажные» сутки.

Вначале в блоке перемежаемости формируется последовательность сухих и влажных суток. Соответствующие вероятности перехода находятся из данных наблюдений. Затем в блоке интенсивности формируется количество выпавших осадков в сутки с ненулевыми осадками с использованием того или иного распределения интенсивности осадков во влажных сутках. В данной работе использовано экспоненциальное распределение осадков [3, 4]. Количество осадков рассчитывалось по формуле:

$$R_{day} = \mu_{mon} (-\ln(rnd_1))^{rexp}, \quad (1)$$

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 случайной выборки в интервале (0,1). Показатель экспоненты $rexp$ заключен между числами 1 и 2.

В данной модификации генератора осадков требуются три входных параметра, а именно: среднесуточное значение (интенсивность) осадков для каждого месяца, и две вероятности перехода. Экспоненциальный коэффициент $rexp$ определяется эмпирически. Его оптимальная величина зависит от рассматриваемого региона. В работе тестировались два варианта генератора с показателями экспоненты, равными 1,1 и 1,3. Они обозначены соответственно, как Gen1 и Gen2.

Основным показателем качества модели генератора осадков является его способность адекватно воспроизводить месячные

суммы. На рисунке 1 приводится сезонный ход этого показателя для указанных трех вариантов генератора в сравнении с наблюдениями. В годовом ходе осадков прослеживаются зимний (ноябрь-февраль) максимум с высокими значениями месячных сумм и менее выраженный локальный максимум в июне. В среднем, месячные суммы в зимнее время вдвое выше, чем в июне. Поэтому основной упор в дальнейшем будет делаться на 4-х зимних месяцах.

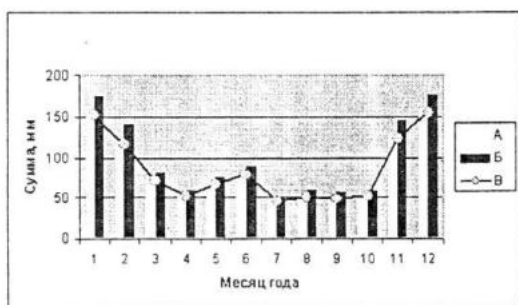


Рисунок 1 – Средние месячные суммы осадков. Случай А и Б относятся соответственно к вариантам модели Gen2a и Gen2b, В – наблюдения

Из рисунка следует, что наилучшим образом согласуется с наблюдениями модель Gen1, т.е. вариант генератора с $rexp = 1,1$. Годовые суммы в данном варианте равны 1048 мм и 1020 мм согласно модельным и данным наблюдений соответственно, т.е. разница составляет менее 3%. При увеличении показателя экспоненты месячные суммы для любого месяца монотонно возрастают. По данным модели Gen2, годовая сумма достигает величины 1170 мм, т.е. превышает фактическую сумму на 15%.

Расхождения в повторяемости осадков (рисунок не приводится) в различных вариантах генератора незначительны. Этот параметр формируется в модели в блоке генерации последовательности сухих и влажных событий, который не зависит от блока генерации интенсивности осадков. Повторяемость осадков плавно снижается по мере перехода от зимних к летним месяцам. Амплитуда годового хода невероятно велика. Если летом доля дождливых дней составляет немногим более 20%, то в зимние месяцы (декабрь-февраль) – в каждой декаде в среднем 6-7 дней идут дожди.

Весьма важным параметром, характеризующим изменчивость ежедневных осадков (энергию процесса), является их дисперсия

или производная от нее величина – среднеквадратическое отклонение. На рисунке 2 приводится годовой ход стандартного отклонения ненулевых осадков. В отличие от рисунка 1, здесь наибольшее расхождение с наблюдениями проявляется в модели с наименьшим показателем распределения. Как будет показано ниже, это связано с тем, что малый показатель экспоненты не обеспечивает фактический вклад крупных, экстремальных событий, которые в природе наблюдаются чаще, чем это следует, скажем, из классического Гамма распределения, часто применяющегося к ежесуточным осадкам («тяжелые хвосты» плотности распределения). В нашем случае лучше всего «вытягивает» фактическую изменчивость вариант генератора с большим показателем экспоненциального распределения, т.е. вариант Gen2.

Отметим, что данный вариант модели удовлетворительно обеспечивает необходимый уровень дисперсии в интересующие нас в первую очередь зимние месяцы. Значительное расхождение модели и натурных данных в сентябре в этом плане не столь существенно. Главная причина этого расхождения – единственное событие в выборке натурных данных за сентябрь – суточная сумма осадков, равная в 176 мм.

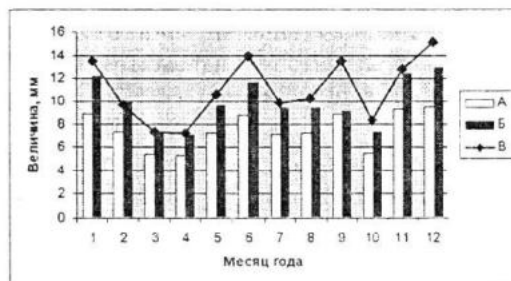


Рисунок 2 – Стандартное отклонение осадков. Обозначения – как и на рисунке 1

Вообще говоря, выбор варианта модели зависит от цели, которая преследуется. Если изучается роль осадков в гидрологическом цикле речного бассейна Крыма, то незначительные суточные суммы осадков не представляют большого интереса. Гораздо важнее прогнозировать вероятность крупных ливней и определить их вклад в водосбор горных рек региона Ай-Петри. Полную информацию в этом вопросе дают дифференциальная или кумулятивная функции распределения осадков по интенсивности. Но нас в первую очередь будут

интересовать «хвосты» распределения, т.е. та часть гистограммы осадков, которая относится к осадкам экстремально большой интенсивности, - событиям чрезвычайно редким согласно некоторому критерию.

Этот критерий примем следующим образом. Будем считать редкими осадки, превышающие такую интенсивность, когда количество осадков этой интенсивности в «кармане» гистограммы не превышает единицы. Для построения гистограммы определим число карманов, пользуясь эмпирическим правилом: число карманов примерно равно корню квадратному из количества событий (величина выборки). Поскольку длина выборки для каждого месяца в нашем случае составляет около 900 значений, то число карманов примем равным 30. Определим теперь редкие осадки, пользуясь указанным выше правилом для их определения.

Расчеты показывают, что в течение года интенсивность редких осадков колеблется незначительно и находится в пределах 20 – 30 мм в сутки. Для зимы можно принять за уровень редких осадков величину 30 мм. Теперь важно определить, какой вклад они дают в месячные суммы. Оказалось, что этот вклад – существенный. Так, в декабре доля редких осадков в месячной сумме составляет почти половину (46%). Представляет интерес значимость в месячном балансе сверх редких осадков, т.е. максимальных осадков, выпавших единственный раз за весь исследуемый период (32 года). На рисунке 3 приводятся величины таких осадков для каждого месяца года в сравнении со среднемесячными суммами. Хорошо видно, что один раз за исследуемый период за сутки выпадало количество осадков, равное среднемесячной норме, а в некоторые месяцы (июнь, июль, сентябрь) в 2-4 раза превышающие ее.

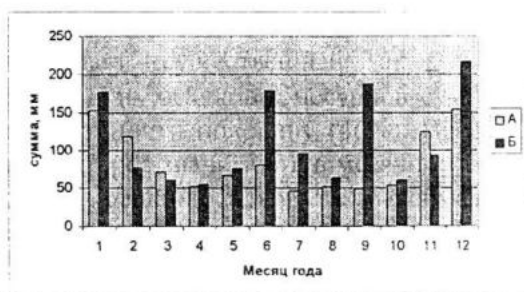


Рисунок 3 – Среднемесячные (А) и максимальные суточные (Б) суммы осадков

Моделирование экстремально редких осадков приобретает особое значение из-за того, что именно они причиняют наибольший ущерб. Сравнение статистик редких осадков, превышающих 20 мм и 30 мм в сутки, полученных из натуральных и синтетических рядов, показало, что чем круче функция плотности вероятности осадков (большой показатель экспоненты экспоненциального распределения), тем лучше описывается статистика более крупных событий. Если осадки с интенсивностью более 20 мм в сутки лучше описываются моделью Gen1 ($rexp = 1,1$), то статистика осадков выше порогового значения 30 мм лучше описывается моделью Gen2 ($rexp = 1,3$).

Наиболее полное представление об адекватности моделирования в различных диапазонах интенсивности осадков дает интегральная, или кумулятивная функция распределения. Определим кумулятивную функцию распределения случайной величины X как вероятность

$$P(x) = P\{X < x\}. \quad (2)$$

На рисунке 4 дается пример кумулятивной функции распределения интенсивности осадков для январской выборки. Здесь на нижней шкале отложен двойной логарифм функции P – интегральной функции распределения, а на верхней шкале – климатическая повторяемость T соответствующих событий x , которая связана с функцией $P(x)$ соотношением

$$T(x) = 1/(1 - P(x)). \quad (3)$$

Крестики на рисунке относятся к модели (вариант Gen2), кружки – к наблюдениям. Сплошные кривые соответствуют Гамма-распределению. Жирная кривая – наблюдения, тонкая – модель. Видно, что этот вариант модели с показателем $rexp = 1,3$ неплохо описывает статистику крупных событий осадков, но занижает суммы осадков (по сравнению с натурными данными) в диапазоне умеренных и слабых осадков. На рисунке 4 приводятся кривые Гамма-распределения, относящиеся к натурным и модельным рядам, для иллюстрации того, насколько хорошо статистика ежесуточных осадков подчиняется этому часто приме-

няемому распределению. Заметно существенное расхождение кривых Гамма-распределения с эмпирическими функциями распределения, полученными как из натуральных, так и из синтетических рядов, в области экстремально больших величин осадков. Вероятность реализации крупных редких событий убывает не по экспоненциальному, а по степенному закону. Экстремальные осадки в природе реализуются ча-

ще, чем это следует из Гамма-распределения. Крутизна кривых этого распределения в области экстремальных осадков очень чувствительна к величине отдельных событий. Так, если убрать максимальную величину 176 мм из выборки наблюдений, расхождение между двумя кривыми резко уменьшается (см. врезку на рисунке 4).

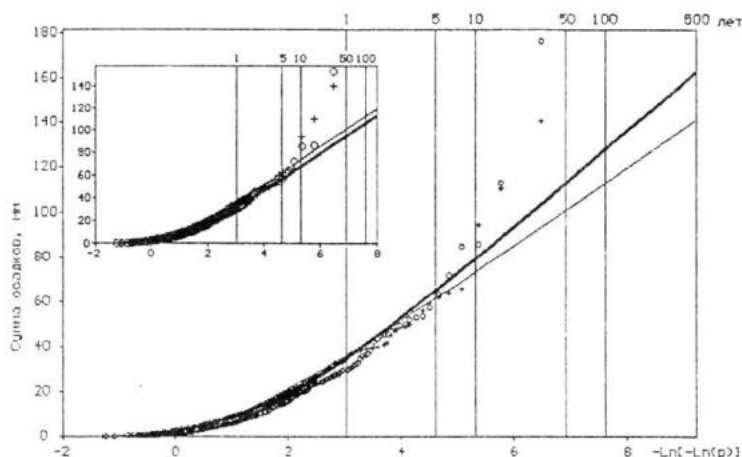


Рисунок 4 – Кумулятивная функция распределения осадков (выборка за январь)

Итак, на примере горного региона Ай-Петри протестирована модель стохастического генератора осадков, позволяющая генерировать климатические временные ряды ежедневных осадков неограниченной длительности. Статистика этих синтетических рядов близка к статистике, полученной по данным натуральных наблюдений. При этом использование экспоненциального распределения интенсивности ненулевых осадков вполне приемлемо для моделирования во многих практических случаях. Вместе с тем, его нельзя считать универсальным, и оно не свободно от некоторых противоречий. Так, использование экспоненциального распределения не позволяет при одном и том же показателе экспоненты равноценно воспроизводить месячные суммы осадков и статистику редких, но значительных (катастрофических) по величине событий осадков. Использование распределения с малым показателем экспоненты позволяет генерировать ряды, хорошо согласующиеся с наблюдениями по месячным суммам, в то время как для воспроизведения адекватной статистики крупных собы-

тий лучше подходит экспоненциальное распределение с большим показателем экспоненты. Перспектива улучшения работы генератора видится в поиске и применении других видов распределения осадков по интенсивности (в том числе и непараметрических).

ЛИТЕРАТУРА

1. Климат Украины. Под редакцией В.М. Липинского, Киев, 2003. – 343 с.
2. Richardson, C. W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour. Res.*, 17, 1981. – P. 182–190.
3. Посошков В.Л., Прусов А.В. Применение стохастического генератора осадков для моделирования рядов суточной дискретности. В сб. трудов международного научно-технического семинара «Системы контроля окружающей среды». 2007.
4. Williams, J.R. Chapter 25: The EPIC Model. *In Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch., 1995. – P. 909–1000.