

УДК [551.501.777+628.221]:519.23

КОРРЕКТИРОВКА КРИВЫХ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОЖДЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ НЕПОЛНОЙ СЕРИИ (ОТБОР ПО КРИТЕРИЮ) К ПОЛНОЙ

Д.С. Петренко

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
altcreaw@gmail.com

Приводится сравнительный анализ характеристик дождей, полученных путем обработки полной серии данных и выборки по некоторым критериям. Показано, что применение критериев приводит к недоучету интенсивности частых событий, что, в свою очередь, приводит к ошибочным проектным решениям. Рассматривается способ приведения кривых интенсивности к результатам полной серии на основе данных осадкомера.

Ключевые слова: жидкие осадки; статистический анализ, кривые редукции осадков, интенсивность дождя.

APPROXIMATION THE IDF CURVES IN THE TRANSITION FROM THE PARTIAL-DURATION SERIES (SELECTION BY CRITERIA) TO THE ALL EVENTS

D.S. Petrenko

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

The paper is devoted to the comparative analysis of the rainfall characteristics received from full series with all events and partial-duration series with certain criteria. It was shown that the use of some criteria leads to the lack of frequent rainfall events. This in turn leads to wrong design decisions. The article considers the method of intensity-frequency-duration curves applied to the results of the full series based on data of the non-recording rain gauge.

Keywords: precipitation, statistical analysis, rainfall intensity.

Введение

Интенсивность выпадения жидких осадков — в том виде, в каком она необходима инженерам, — является одной из самых сложных климатических характеристик. Это четырехмерный массив данных: интенсивность, продолжительность, повторяемость, представленные на территории страны. При использовании записей стандартного плувиографа П-2 получение точных значений интенсивности за интервалы времени до 10 минут является трудновыполнимым. Период наблюдений влияет на точность прогнозируемых значений, а недостаточная плотность метеорологической сети сказывается при картировании данных. Все три проблемы взаимосвязаны и остро ощущаются специалистами-метеорологами.

Отличительная особенность российской гидрометеорологической сети — это наличие большого числа станций, прекративших наблюдения после развала Советского Союза. Некоторые из них имеют внушительный срок наблюдений, что делает их данные крайне полезными при анализе территориальных зависимостей.

Пригодные данные pluviографов содержатся в работах [4, 5], однако они ограничены критерием, введенным Гидрологическим институтом в 1950-х годах. В Водном кадастре СССР [3] представлены средние значения интенсивности за интервалы 5, 10, 15, 20, 30, 45 и 60 минут, превышающие установленную норму; из них можно считать полезными лишь 5-минутные значения. Благодаря усилиям ГГИ и метеослужбы существует ряд носителей данных об осадках за период 1936—1990 гг., покрывающих значительную территорию нашей страны.

Для упрощения расчетов обычно используются не все данные наблюдений. Неполной серией можно назвать выборку из совокупности всех рассматриваемых дождей, согласно какому-либо критерию. Например, можно подвергнуть обработке только максимальные годовые суммы осадков, можно отбирать для анализа дожди, общий слой которых превосходит некоторое значение. В практике обработки записей дождей во многих странах использовалось значение нижней границы средней интенсивности, причем для каждого интервала времени оно различалось. Это позволяло отбросить незначительные дожди, тем самым сократив затраты труда на расшифровку.

В отечественной практике данный подход сохранялся до 1935 г. При отборе записей «ливневого» дождя использовались нормы Э.Ю. Берга: под ливнями понимались дожди, в течение которых за тот или иной промежуток времени (t) интенсивность осадков (I) не опускалась ниже следующих значений:

t мин	5	10	20	30	45	60	120	240
I мм/мин	0,5	0,38	0,3	0,27	0,23	0,2	0,15	0,11

Иными словами, производилась выборка тех ливневых участков записи, на которых интенсивность превышала свой порог. В интервалах ≥ 10 мин пороговые значения Э.Ю. Берга были достаточно завышенными и отсекали даже те ливневые участки, которые повторяются раз в десятилетие. После 1935 г. расшифровка производилась силами ГГИ совместно с УГМС уже несколько другим образом. Ввиду специфики института обработке подвергались дожди, формирующие дождевые паводки рек, т.е. слой осадков за которые составлял 10 мм и более. После 1960 г. метеослужба обрабатывала ленты самописцев таким же образом.

Очевидно, что каждый критерий по-своему влияет на результаты расчетов (кривую обеспеченности). Ввиду того что ленты pluвиографов не хранятся, а расшифрованные записи не являются полными, имеется значительный объем данных, нуждающихся в корректировке. Цель данной работы — показать степень отклонения расчетных значений интенсивности при обработке неполной серии данных и предложить один из способов восстановления кривых.

Получение кривых интенсивности осадков

На основе наблюдений станции Ленинград, ГГО за период 1936—1990 гг. автором было получено семейство кривых интенсивности (рис. 1). Процесс обработки можно кратко описать следующим образом. Вначале были оцифрованы все записи (за обозначенный период вышло 323 дождя) из доступных источников [4, 5] для последующей обработки в MS Excel. Полученный ряд нельзя назвать исчерпывающим, учитывая общее количество забракованных записей и пропущенных

выпусков ежемесячника [5], однако пропуски приводят лишь к некоторому снижению расчетных величин, не превышающему и 5 % для дождей с периодом превышения $P = 1$ год. В то же время использование критериев отсекает огромное число событий, что сказывается на результате достаточно негативно.

Для каждой записи были определены максимальные средние значения интенсивности за различные интервалы времени t . Затем в каждом обозначенном интервале значения ранжировались для определения кумулятивной повторяемости $P_{\%}$ (обеспеченности событий) по формуле Вейбулла (1). Поскольку большинство инженеров работает с вероятностью превышения в какой-либо год (или числом событий за год), повторяемость $P_{\%}$ была приведена к условному году по формуле

$$P_{\%} = \frac{n_i}{(n+1)}, \quad (1)$$

$$S = mP_{\%} = \frac{n}{N} \frac{n_i}{(n+1)}, \quad (2)$$

где m — среднее число событий в год, n — общее число событий, N — число лет наблюдений, n_i — порядковый номер события в ранжированном ряду. Также были оцифрованы данные Водного кадастра, а именно 5-минутные значения интенсивности. За период 1897—1935 гг. в 173 случаях интенсивность ливня превышала 83 л/(с·га) (норма Берга для заданного интервала). Повторяемость событий S определялась аналогичным образом.

Использование критериев для кривых интенсивности осадков

Для сравнения сведем на один график (рис. 1) все кривые $Q(S)$ ¹ полученные по различным сериям данных на станции Ленинград, ГГО. Первая серия — данные [4, 5], вторая — 5-минутные значения интенсивности из Водного кадастра. Сопоставив две кривые, можно сделать следующие выводы. Во-первых, в логарифмических координатах кривая $Q_5(S)$ для 5-минутного интервала имеет такой же наклон, что и кривая $Q_{360}(S)$ для 6-часового интервала, и, во-вторых, с увеличением повторяемости кривые интенсивности начинают отклоняться вниз — это особенно заметно для интервалов менее часа. При наложении критерия на вторую серию данных кривые практически сходятся (абсолютное отклонение не превышает +10 %, а среднее отклонение составляет +5 %). Это означает, что данные Водного кадастра могли бы служить ориентиром при восстановлении исходного вида кривой, будь норма Берга в других интервалах более низкой.

Таким образом, введение критерия приводит к занижению расчетной интенсивности частых дождей, причем отклонение начинает проявлять себя уже при периоде превышения $P = 2 \dots 3$ года². Для каждого интервала времени эта точка

¹ В гидрометеорологии интенсивность I обычно выражается в мм/мин. В инженерной практике принято выражать интенсивность в л/(с·га) и обозначать $Q = 166,7 I$.

² Повторяемость S и период однократного превышения P имеют обратную зависимость: $P = 1/S$. При анализе редких событий обычно используют понятие периода превышения, а для частых событий — повторяемость.

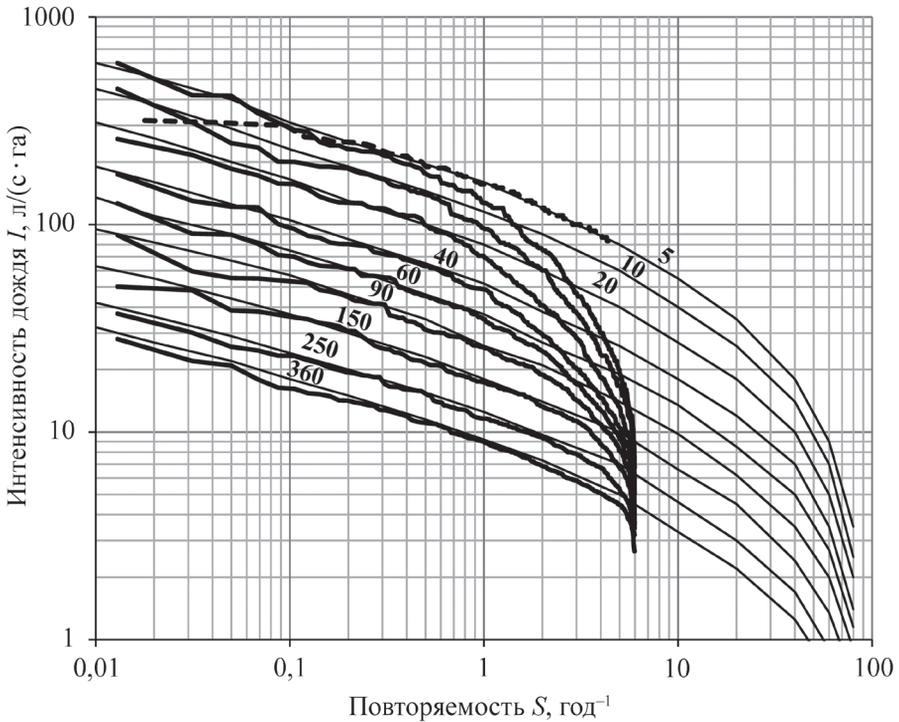


Рис. 1. Кривые интенсивности дождя за различные интервалы времени по данным полной и неполной серии.

будет отличаться от других (см. рис. 1). Отклонение проявляется при продолжительности дождя менее 6—8 часов. При уменьшении интервала t величина отклонения возрастает, причем для частых дождей в большей мере. Это нетрудно объяснить: сумма осадков зависит не только от интенсивности, но и от продолжительности дождя; короткие ливни (по сравнению с затяжными дождями) просто не успевают набрать высокий слой осадков.

Корректировка кривых интенсивности

Способов приведения значений интенсивности к полной серии может быть несколько. Однако для большинства станций, открывшихся в середине 1930-х годов и позднее, данные которых не могли попасть в Водный кадастр, должен существовать способ, опирающийся на стороннюю информацию. Надежным источником данных об осадках являются значения суточного слоя, т.е. данные наблюдений по осадкомерам. ВНИИГМИ — МЦД предоставляет открытый доступ к данным на действующих станциях [6]; эти же данные можно найти в Метеорологическом ежемесячнике. Для Санкт-Петербурга имеется длительный ряд наблюдений за период 1881—2016 гг.

При выборе значимых событий необходимо руководствоваться температурными условиями, которые определяют тип осадков: твердые или жидкие. Интересующие нас жидкие осадки могут выпадать даже в зимний период, поэтому привязка ко времени года здесь неуместна. С другой стороны, в период кратковременных потеплений жидкие осадки учитываются как результат снеготаяния. В рамках настоящей работы примем, что число дождей приблизительно равняется числу дней с осадками, наблюдавшимися при положительной среднесуточной температуре. Таким образом, мы получим за весь период наблюдений 16 745 дней с осадками (в среднем 123 «дождя» в год) и определим повторяемость событий описанным выше способом.

Перед дальнейшим использованием кривой обеспеченности суточного слоя осадков H необходимо сгладить и экстраполировать ее значения для периодов превышения от одного года. Для этого подбираются параметры уравнения регрессии следующего вида:

$$\lg H = a \lg [b/S]^c, \quad (3)$$

где a , b , c — некоторые параметры, S — повторяемость события. Наилучшие результаты достигаются методом наименьших квадратов при сопоставлении значений $\lg H$ в диапазоне повторяемости 0,05—1(10) раз в год.

Уравнение (3) отличается по форме от типичных распределений, широко распространенных в гидрологической практике, однако их подгонка производится под серию годовых максимумов, а это уравнение описывает полную серию. Предложенное трехпараметрическое уравнение успешно справляется с поставленной целью (аппроксимация кривой обеспеченности), причем в некоторых случаях даже лучше, чем широко известное распределение Гумбеля (рис. 2). Подгонка уравнения осуществляется лишь для левой половины кривой обеспеченности, сформированной редкими событиями; правая половина в сглаживании не нуждается. В случае данных для Санкт-Петербурга значения параметров уравнения (3) имеют следующие значения: $a = 1,13$, $b = 64$, $c = 0,396$, а исходные ординаты кривой для периодов превышения P более 0,1 года были заменены на значения, полученные подстановкой этих параметров в уравнение (3).

Следует обратить внимание на то, что на рис. 1 показаны кривые интенсивности, восстановленные графоаналитически с использованием среднего числа дождей в год. Наклон кривых интенсивности в логарифмических координатах приблизительно совпадает с наклоном кривой суточного слоя осадков (рис. 4), из чего можно сделать важное теоретическое предположение. Значения ординат кривых редукции ψ , для разных значений повторяемости должны быть равны, т.е. отношение слоя осадков за интервал t к равнообеспеченному суточному слою не зависит от обеспеченности, как ранее предполагал Г.А. Алексеев [1]. Вариации значений объясняются неточностью данных плювиографа относительно данных осадкомера, а также различием сопоставляемых рядов. Если задаваться теми же интервалами обеспеченности: $P \leq 25\%$ и $25\% < P \leq 50\%$, то в большинстве случаев мы получим практически одинаковые значения со средней разницей всего 3% (рис. 3). Как уже было сказано, причиной занижения сумм осадков высокой

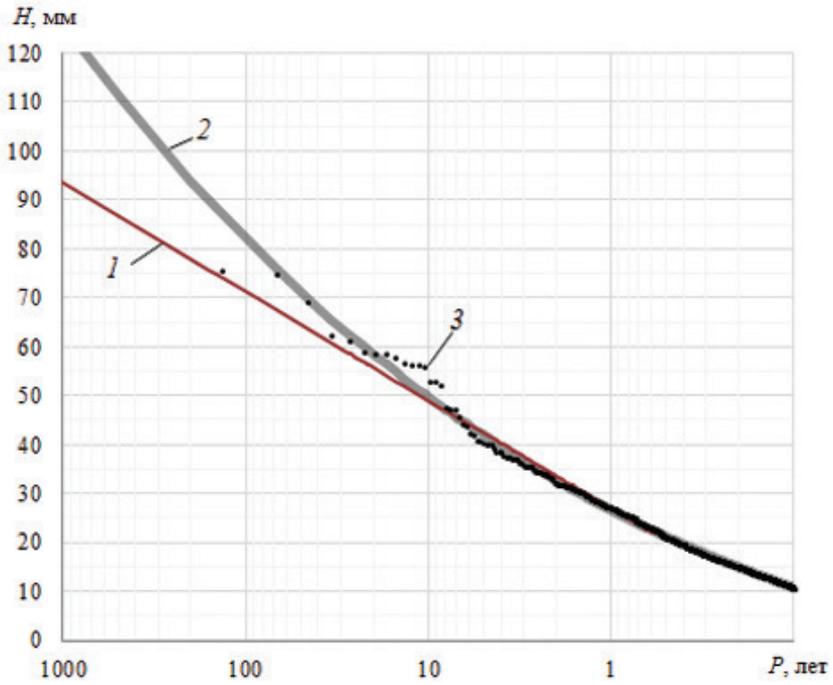


Рис. 2. Аппроксимация кривой обеспеченности суточного слоя осадков для Санкт-Петербурга.

1 — суточные слои осадков, 2 — аппроксимирующее уравнение автора, 3 — распределение Гумбеля.

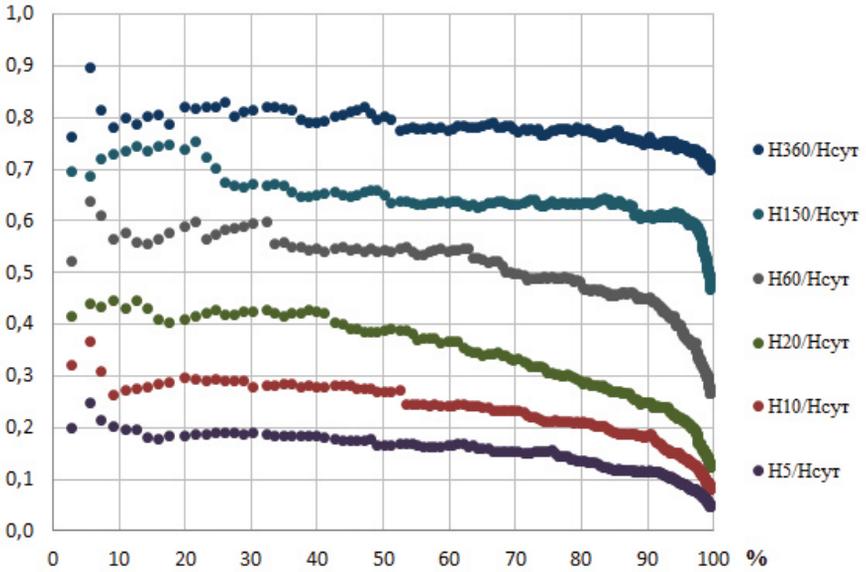


Рис. 3. Ординаты кривых редуции осадков ψ , различной обеспеченности.

обеспеченности является используемый критерий отбора: выборка дождей с общим слоем ≥ 10 мм отбрасывает множество записей, которые содержат участки высокоинтенсивных ливневых осадков. К тому же серия годовых максимумов содержит значительно меньше точек, пригодных для сопоставления.

Определяя средние значения ординат кривой нарастания слоя осадков для каждого интервала t , необходимо верно задать диапазон значений повторяемости при работе с данными, полученными путем обработки неполного ряда. Например, для расчета среднего отношения H_{720}/H подходит диапазон повторяемости S от 0,01 до 30 раз в год, а для отношения H_{20}/H — уже до 0,5 раз в год (рис. 4). Результаты расчетов для Санкт-Петербурга приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения ординат кривой редукции осадков $\psi_t = H_t/H$ для интервалов t

t мин.....	2	5	10	20	30	40	60	90	150	250	360	540	720
ψ_t	0,11	0,20	0,29	0,43	0,48	0,52	0,57	0,61	0,69	0,76	0,81	0,87	0,90

При значении $t = 1440$ мин отношение слоя по плювиографу к суточному слою по осадкомеру стремится к 0,91, что можно объяснить недоучетом осадков

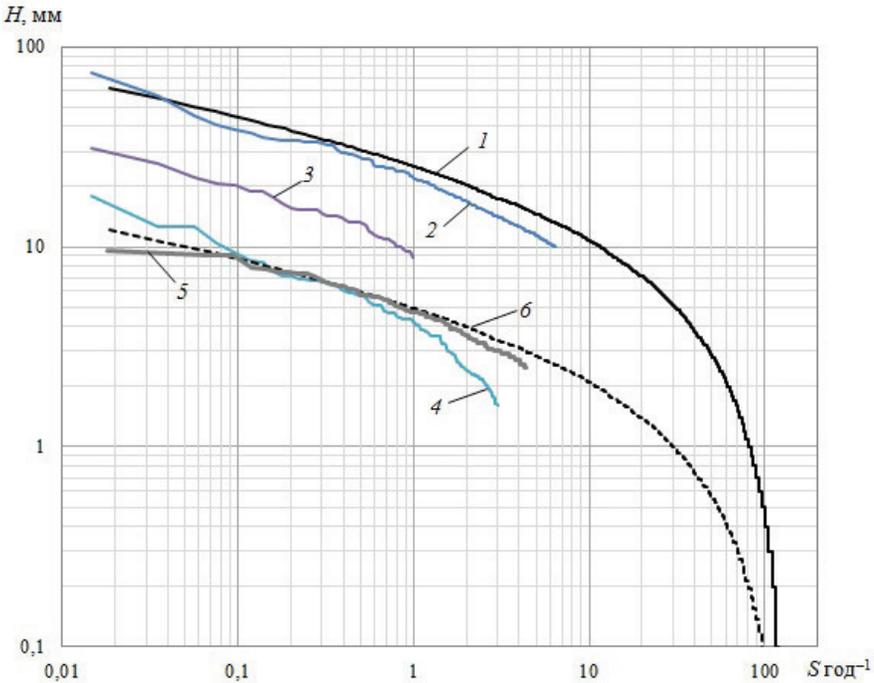


Рис. 4. Процедура восстановления кривых интенсивности.

- 1 — суточные слои осадков; 2 — 720-минутный слой осадков (неполная серия);
 3 — то же за 20 мин; 4 — то же за 5 мин; 5 — слой осадков за 5 мин (полная серия);
 6 — восстановленный слой осадков за 5 мин.

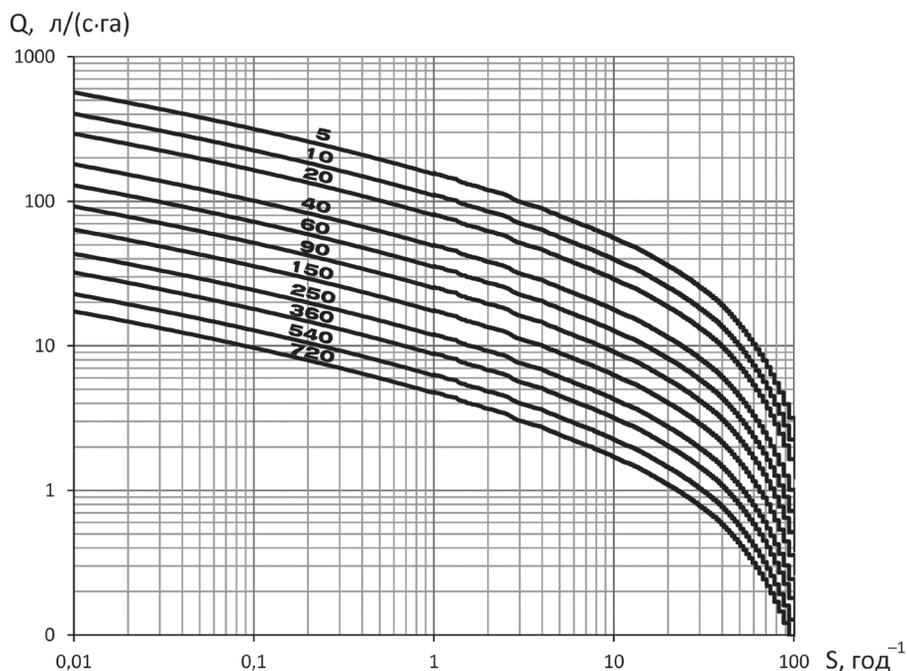


Рис. 5. Восстановленные кривые интенсивности дождя за различные интервалы времени.

стандартным плювиографом [2]. Сопоставить более короткие интервалы не представляется возможным, поэтому ограничимся использованием значений ψ_t только для восстановления семейства кривых интенсивности.

Зная ординаты кривых редукции $\phi_t = \psi_t/t$ и значения суточного слоя осадков для каждого из 16 745 событий, можно определить интенсивность во всех обозначенных интервалах. Таким образом было построено семейство кривых интенсивности $Q(S)$, которое представлено на рис. 5. Отклонение от значений, определенных графоаналитическим способом, не превышает 2—5 %. Преимущество же данного метода корректировки в простоте его программной реализации.

Заключение

Определение интенсивности жидких осадков за различные интервалы времени и распределения этой характеристики по территории страны является трудной, но выполнимой задачей, в решении которой заинтересован широкий круг специалистов. Особенно актуально это для Российской Федерации, где исследования в этой области прерываются в середине 1980-х годов, как прерываются (по известным причинам) и наблюдения на многих станциях бывшего СССР. Даже вклад Гидрологического института уже трудно назвать исчерпывающим: длина рядов данных наблюдений с момента публикации основных работ ГГИ в этой области многократно возросла, увеличилась плотность сети, которая играет ключевую

роль для столь обширной территории. Также остались нерешенными те вопросы, которые оказались вне сферы интересов гидрологов, — характеристики частых дождей, применяемые, например, в проектировании дождевых канализаций. Используемые критерии отбора дождей просто не позволяют применять в проектировании обработанные материалы по осадкам, так как приводят к занижению именно расчетных параметров.

Неполная серия данных использовалась с единственной целью: сократить время ручной обработки до приемлемого уровня. В эпоху цифровой обработки использование критериев теряет первоначальный смысл: данные переносятся на электронные носители, а все расчеты сводятся к написанию нескольких строк кода. Росгидромет постепенно оцифровывает данные наблюдений на бумажном носителе и создает регулярно обновляемые базы данных, что способствует быстрому решению поставленной задачи. В ранее опубликованных материалах [4, 5] приводятся записи дождей с общим слоем осадков от 10 мм. Если прочие записи не сохранились в архивах местных УГМС (а их число в несколько раз превосходит число опубликованных записей), то существует большой объем данных, требующих корректировки, что особенно актуально для закрытых станций.

Привести столь ограниченную выборку к статистической структуре полной серии можно при помощи наблюдений за суточным слоем осадков; на некоторых станциях этот временной ряд даже превосходит по длине ряд данных наблюдений по плювиографу. Однако самое главное то, что данные осадкомерных наблюдений публикуются в полном объеме, что позволяет восстановить исходное семейство кривых интенсивности с устранением недоучета осадков в коротких интервалах времени путем сглаживания и экстраполяции значений как в область частых, так и в область редких событий.

Описанная в статье процедура может выполняться для данных любой станции, на которой отсутствуют в необходимом объеме записи плювиографов. При наличии полного комплекта записей за 25—30-летний период необходимость в данной процедуре отпадает — предпочтение следует отдать обработке данных самописца.

Список литературы

1. *Алексеев Г.А.* Объективные статистические методы определения характеристик ливневых осадков // Метеорология и гидрология. 1966. № 7. С. 22—27.
2. *Горбунова И.Г., Боженко В.Г., Павлова Н.П.* О систематических погрешностях стандартного плювиографа // Труды ГГО. 1968. Вып. 215. С. 125—134.
3. Ливни на территории СССР. Водный кадастр СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1940.
4. Метеорологические данные за отдельные годы. Ливневые дожди и суточные количества осадков. Вып. 3. По Ленинградской, Псковской и Новгородской обл. Л.: Гидрометеоздат, 1961.
5. Метеорологический ежемесячник СССР. Вып. 3. Северо-Западное УГМС. Часть 2. Ежедневные данные. Л.: ЛГМО — Обнинск: ВНИИГМИ — МЦД, 1961—1990.
6. Российский гидрометеорологический портал ВНИИГМИ — МЦД [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru> (дата обращения: 10.10.2017).