

УДК 556.166.2; 556.121.8

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(165-172)

Д.Е. КЛИМЕНКО, Е.С. ЧЕРЕПАНОВА, Т.В. КУЗНЕЦОВА

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15, Россия,
listopad19531@mail.ru, cherepanova_es@rambler.ru, hydrotanka@gmail.com

ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАВОДКОФОРМИРУЮЩИХ ЛИВНЕЙ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ТОБОЛ

Характеристики сильных дождей имеют ключевое значение в расчетах максимальных расходов воды на малых реках. Приводятся результаты исследования основных закономерностей внутригодового распределения характеристик (количество, сумма осадков, продолжительность) паводкоформирующих ливней Урала, с суммой осадков за ливень более 10 мм, основанные на анализе свыше 25 тыс. единичных ливней по данным плувиографических наблюдений за 80-летний период на всех доступных метеостанциях в российской части бассейна р. Тобол. Среднее количество паводкоформирующих ливней в году составляет 10,1, в горных районах оно на 20–30 % выше, чем на равнине. Наибольшая неоднородность количества ливней по территории отмечается в апреле и октябре. Среднемесячные суммы осадков за ливни постоянны в течение года, тогда как абсолютные максимумы повсеместно наблюдаются в июне. Наибольшая продолжительность ливней зафиксирована в весенние и осенние месяцы. Приводятся сведения о способах классификации хода осадков внутри суток. Установлено, что для 75 % зафиксированных ливней более 50 % суммы осадков выпадает в первую треть их продолжительности. Равномерное выпадение осадков характерно лишь для 5 % наблюдаемых ливней. Выполнено моделирование характеристик ливня за 80-летний период по ряду метеостанций на основе логнормального закона; получены удовлетворительные результаты в диапазоне редких вероятностей превышения (менее 10 %). Результаты исследования представляют важное значение в стохастических моделях формирования сильных дождей и в детерминированных моделях, основанных на использовании радиолокационной информации по облакам и осадкам.

Ключевые слова: *дождевые паводки, ливневые осадки, моделирование, внутригодовое распределение ливней, ГИС-технологии.*

D.E. KLIMENKO, E.S. CHEREPANOVA AND T.V. KUZNETSOVA

Perm State National Research University,
614990, Perm, ul. Bukireva, 15, Russia,
listopad19531@mail.ru, cherepanova_es@rambler.ru, hydrotanka@gmail.com

ASSESSMENT AND MAPPING OF PARAMETERS OF FLOOD-FORMING RAINSTORMS WITHIN THE TOBOL RIVER BASIN

The characteristics of heavy rains are of key importance in to calculating the maximum water flow in small rivers. We present the results from studying the main regularities in the intra-annual distribution of the characteristics (precipitation amount, total precipitation and duration) of flood-forming Ural rainstorms, with the total precipitation amount over 10 mm per rainstorm, based on analyzing more than 25 thousand single rainstorms from pluviographic observations covering the 80-year-long period obtained at all available meteorological stations located in the Russian part of Tobol river basin. The average number of flood-forming rainstorms in a year is 10.1, and in mountainous areas the number of rainstorms is 20–30 % higher than on the plain. The greatest heterogeneity in the number of rainstorms across the territory is recorded in April and October. The average monthly total precipitation amounts for rainstorms are constant throughout the year, whereas absolute maxima are observed everywhere in June. The largest duration of rainstorms is observed in the spring and autumn months. Data on the classification procedures of the behavior of precipitation within a 24-hour period are provided. It is established that for 75 % of the observed rainstorms, more than 50 % of the total precipitation amount correspond to the first one-third of their duration. Uniform precipitation amounts are characteristic only for 5 % of the observed rainstorms. A simulation of the rainstorm characteristics over an 80-year-long period has been carried out for a number of meteorological stations, based on the log-normal law; good results were obtained in the range of rare probabilities of excess (less than 10 %). The findings are of significant importance in stochastic models for the formation of heavy rains and in deterministic models based on using radar information on clouds and precipitation.

Key words: *rainfall floods, storm rainfall, modeling, intra-annual rainstorm distribution, GIS technologies.*

ВВЕДЕНИЕ

Ливневые осадки, один из определяющих факторов в формировании паводочного стока малых рек, хотя и подчинены общим закономерностям формирования дождей теплого периода года, имеют свою специфику. Для территории Урала авторами установлено, что паводкоформирующими являются дожди с суммой осадков более 10 мм и максимальной интенсивностью за 5-минутный интервал более 0,2 мм/мин.

Формирование ливней, пестро распределенных в пространстве, на Урале обусловлено волновыми возмущениями на малоподвижных фронтах [1, 2], в отличие от обложных и морозящих дождей, связанных с крупномасштабными восходящими движениями. Раздельный анализ данных по ливневым и обложным осадкам предопределен различиями в их генезисе.

Распределение ливней и их расчетных параметров (сумма осадков, продолжительность, форма «профиля» ливня и параметры редуции осадков по времени) внутри теплого периода года обуславливает формирование дождевых паводков и экстремальные расходы воды на малых реках. Форма же «профиля» ливня (график хода сумм осадков за минутные интервалы во время ливня), наряду с другими факторами, оказывает влияние на форму гидрографа стока дождевого паводка.

Таким образом, исследование внутригодового распределения ливневых осадков (далее ВГРЛ) и распределения осадков внутри ливня имеют практическое значение как в развитии методов расчета и моделей формирования паводочного стока, так и в разработке моделей формирования собственно ливневых осадков.

Вопросы анализа ВГРЛ для европейской части России освещены в работах З.П. Богомазовой и З.П. Петровой [3]. Однако результаты данных исследований не предполагают их использования в математических расчетных моделях. Закономерности формирования ливневых осадков Урала в разные сезоны года описаны в работах Н.А. Калинина, Л.В. Фрика, А.А. Смирновой, А.Х. Хргиана [4, 5]. Статистические параметры распределения ливней внутри года впервые наиболее полно для европейской части СССР представлены в работах И.И. Галактионова [6] и А.А. Усанкина [7]. Для Урала подобные исследования и моделирование распределения ливней внутри года ранее не выполнялись [8].

В зарубежных публикациях исследования ВГРЛ носят объективный характер, т. е. привязаны к определенным районам. Сведения о характеристике внутригодового и внутрисуточного распределения сильных дождей, обусловленных закономерностями формирования и движения циклонов на территории Австралии, приводятся в [9]. Статистические параметры внутригодового распределения характеристик экстремальных дождевых осадков в пространстве представлены в [10, 11] и др.

Распределение осадков внутри ливня следует отнести к наименее изученным вопросам. Известные работы по типизации и описанию профилей внутрисуточного хода ливня принадлежат И.И. Галактионову [12], З.П. Богомазовой и З.П. Петровой [3], Н.Н. Соловьёвой [13], И.А. Шикломанову [14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследовании закономерностей внутригодового распределения ливневых осадков использовались данные плювиографических наблюдений по 192 пунктам Уральского УГМС за период с 1936 по 2015 г. (около 25 тыс. единичных ливней). Для изучения внутрисуточного хода осадков была обработана информация о 150 выдающихся ливнях. За 2015 г. к анализу была привлечены данные метеорологического радиолокатора, расположенного в Кольцово (г. Екатеринбург) с радиусом обзора около 200 км, позволившие установить области одновременного орошения территории ливнями разного генезиса и случаи неполной фиксации ливней наземной сетью наблюдений.

При статистическом анализе данных по внутригодовому распределению ливней анализируемые характеристики по каждой метеостанции (сумма осадков и продолжительность ливня, интенсивность осадков за временные интервалы различной продолжительности) были разбиты по месяцам. При вычислении статистических характеристик сформированных рядов за каждый месяц авторы исходили из представления о том, что параметры ливней распределены по логнормальному закону, что установлено ранее [15].

Высота слоя дождя (h) возрастает с увеличением его продолжительности. Для описания «профиля» дождя (распределения осадков внутри ливня) использовано соотношение, описанное Г.А. Алексеевым [16]:

$$\bar{h}(t)_{P, \%} = S_{P, \%} \cdot t^{1-n}, \quad (1)$$

где $S_{P, \%}$ — предельная (мгновенная) интенсивность дождя при продолжительности $t \rightarrow 0$, зависящая от вероятности превышения один раз в N лет (величина N связана с обеспеченностью P соотноше-

нием $N = 100/P$; n — показатель степени редукции интенсивности дождя от его продолжительности (изменяется по территории от 0,6 до 0,9).

Расчеты по данной зависимости позволяют получить интегральную кривую нарастания суммы осадков для дождя любой расчетной продолжительности и суммы осадков за ливень. При этом «профиль» дождя (изменение суммы осадков за интервалы времени) будет типовым: максимум осадков характерен для начального интервала времени, после чего суммы осадков плавно убывают. Данное представление не вполне соответствует известным фактам о типе дождя.

Признаки расчетного дождя положены в основу существующих методов типизации дождей по дифференциальным и интегральным характеристикам. Первые из них предусматривают распределение относительных сумм осадков за равные интервалы времени, тип дождя определяется по положению на шкале времени максимальных сумм осадков; вторые — построение интегральной кривой хода дождя во времени в относительных единицах (кривых редукции интенсивностей ливня).

З.П. Богомазова и З.П. Петрова выделили шесть типов хода дождя по положению максимальной ординаты относительного слоя осадков на шкале времени [3]. Н.Н. Соловьевой [13] для района Верхнего Амура в дополнение к шести типам, по [3], выделены еще два.

Типизация, предложенная И.А. Шикломановым [14], выполнена для района равнинной части Украины и Центральной Черноземной области в отношении сильных паводкоформирующих ливней по относительным суммам выпавших осадков в каждую из третей всей продолжительности дождя. Выделено четыре типа: 1-й — 50 % суммы осадков выпадает в первую треть дождя; 2-й — 50 % суммы осадков выпадает во вторую треть дождя; 3-й — 50 % суммы осадков выпадает в последнюю треть дождя; 4-й — равномерная интенсивность в течение ливня.

Все вышеуказанные типизации дают качественную характеристику хода дождя и очень трудоемки при использовании для анализа дождевого стока. При таких условиях желательна количественная характеристика хода дождя, что исключило бы субъективный подход к выбору расчетного типа. Попытка типизации дождей Северо-Запада России предпринята на принципе учета симметричности хода дождей И.И. Галактионовым [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным наблюдений на 192 метеостанциях исследуемой территории за весь доступный период наблюдений установлено, что среднее количество паводкоформирующих ливней в году \bar{n} составляет 10,1 (см. таблицу). Эта величина изменяется в небольших пределах (20–30 %) по территории

Статистические параметры распределения количества ливней, суммы осадков за единичные ливни, продолжительности ливней по месяцам года по данным наблюдений метеостанций Уральского УГМС в 1936–2015 гг.

Расчетная характеристика	Месяц							Год
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
<i>Количество ливней</i>								
Среднее	0,14	1,23	1,86	2,17	1,85	1,54	1,33	10,1
Максимальное	2,00	6,00	8,00	9,00	8,00	6,00	4,00	43,0
Минимальное	0,11	0,89	1,00	1,02	1,02	0,87	0,27	5,20
Коэффициент вариации месячного количества ливней	0,07	0,33	0,56	0,57	0,55	0,48	0,07	0,37
<i>Сумма осадков за ливень, мм</i>								
Средняя	17,0	17,7	18,0	18,9	18,1	17,6	17,8	18,0
Максимальная	62,0	147,4	197,0	161,9	124,7	106,0	48,5	131
Коэффициент вариации	0,45	0,51	0,53	0,58	0,55	0,51	0,34	0,50
<i>Продолжительность ливней, мин</i>								
Средняя	600	525	451	409	469	723	915	582
Максимальная	2100	2165	2700	4160	2500	2565	2140	2700
Минимальная	—	164	54	30	41	187	644	186
Коэффициент вариации	—	0,73	1,07	1,28	0,95	0,74	0,56	0,89

Примечание. Прочерк — данные отсутствуют.

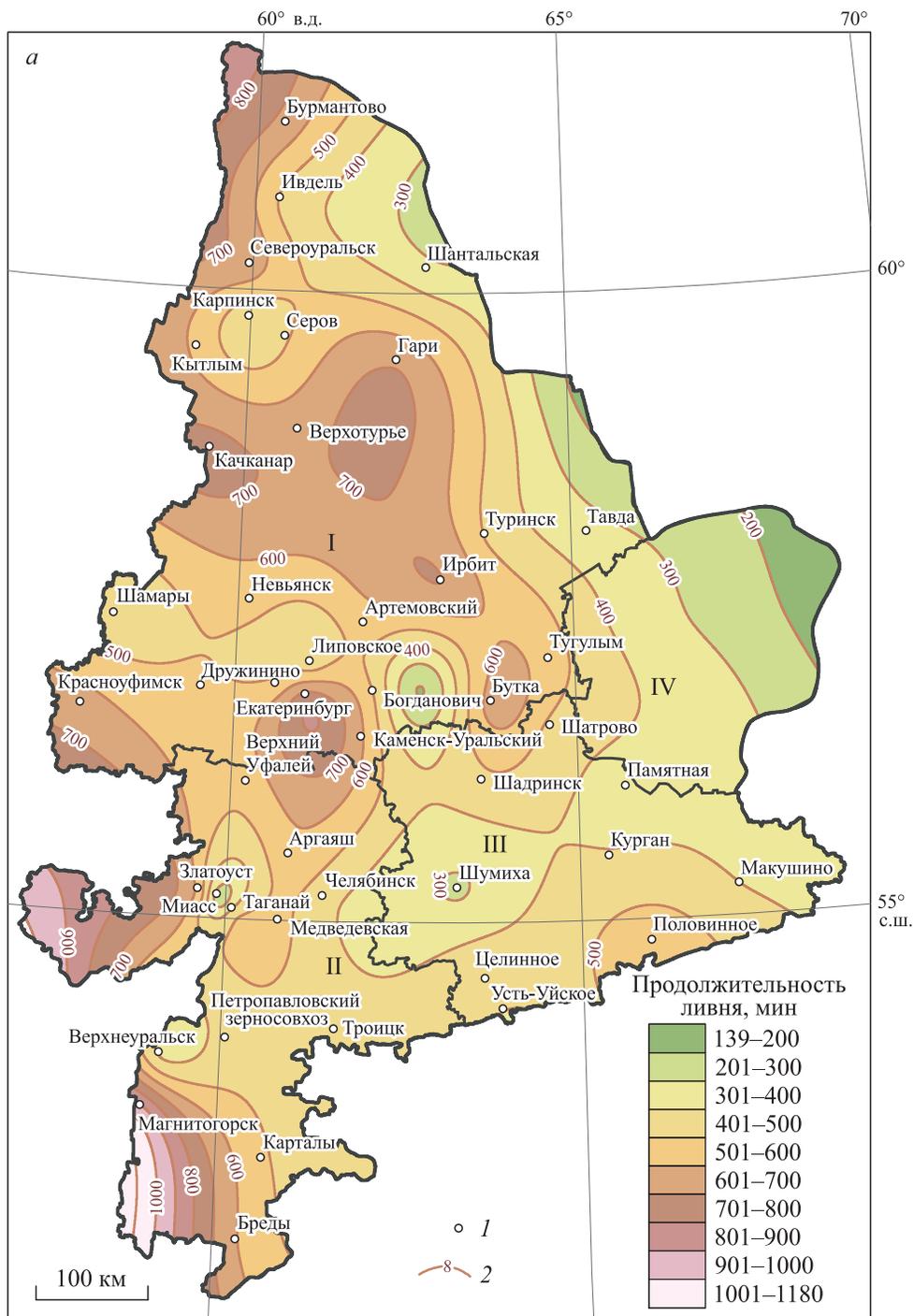


Рис. 1 (начало). Картограммы распределения среднего количества ливней (а) и величин продолжительности дождя (б) в пределах исследуемой территории. 1 — станции, 2 — изолинии равных значений.

Области: I — Свердловская, II — Челябинская, III — Курганская, IV — часть Тюменской области (в границах бассейна р. Тобол).

(рис. 1). Коэффициент вариации количества ливней в году для горных районов достигает 0,45, уменьшаясь на равнинах до 0,30. Пространственная неоднородность месячного количества ливней характеризуется коэффициентами вариации. Наибольшая неоднородность количества ливней по территории характерна для апреля и октября (коэффициент вариации достигает 2–3). В период с мая по сентябрь

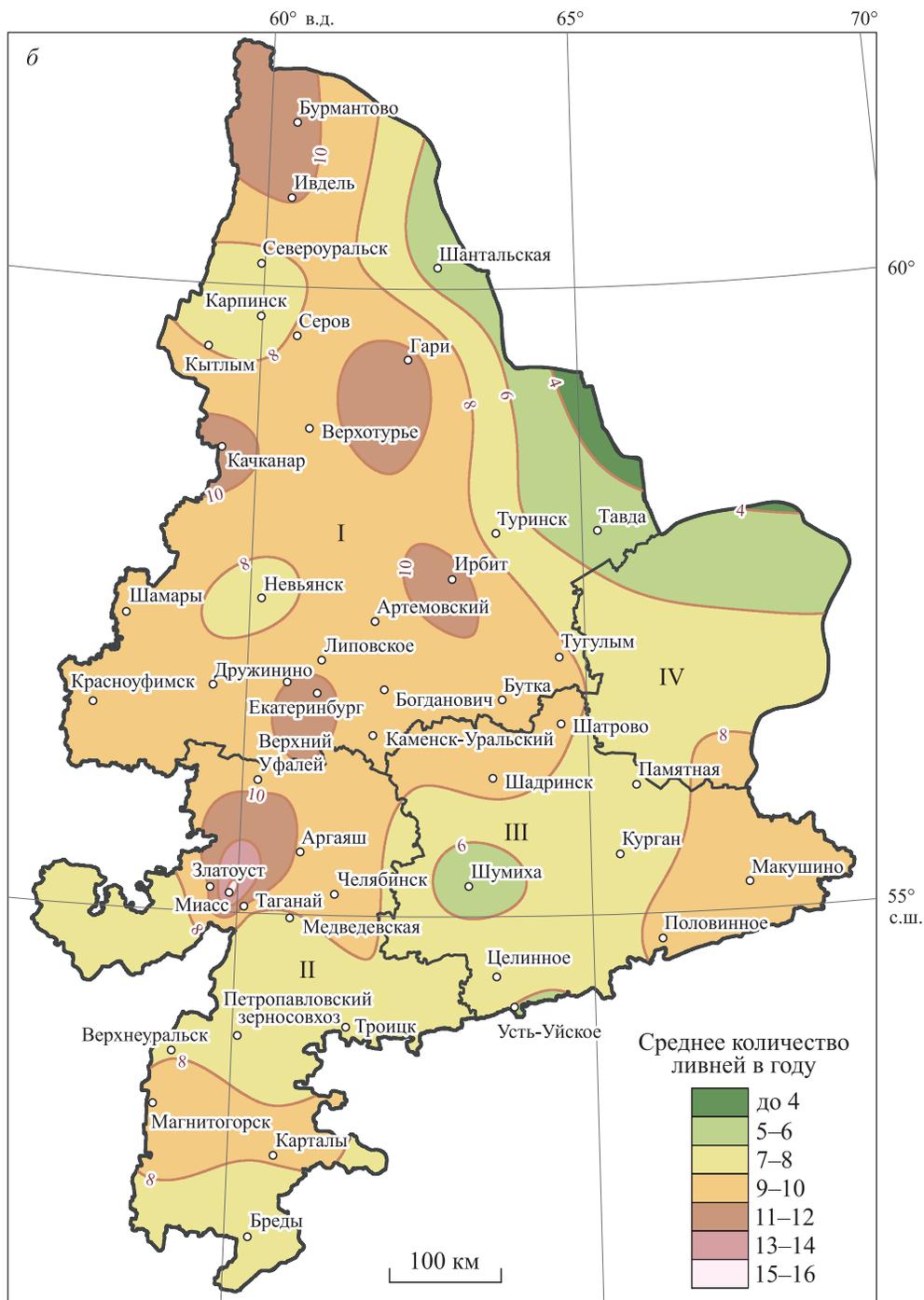


Рис. 1 (окончание).

коэффициент вариации количества ливней в пространстве изменяется от 0,2 до 0,4, т. е. количество ливневых осадков более или менее однородно по территории в летние месяцы.

Относительное распределение количества ливней в году по среднему, среднему максимальному и минимальному значениям практически одинаковое. Коэффициент вариации месячного количества ливней достигает максимальных значений в летние месяцы, уменьшаясь к весне и осени (см. таблицу). Учитывая тот факт, что в статистических расчетах параметров ливней используется двухпараметрическое распределение, приведенные параметры достаточны для вероятностного расчета месячного количества ливней на территории исследования.

Среднемесячные суммы ливневых осадков практически постоянны в течение года (и по величине среднего, и дисперсии), тогда как максимальные наблюдаемые суммы имеют внутригодовую изменчивость: повсеместно формируются в июне, после чего плавно снижаются к октябрю в 3–4 раза (см. таблицу).

Среднемесячная продолжительность паводкоформирующих ливней (см. рис. 1, таблицу) имеет выраженный внутригодовой ход, характеризующийся наименьшей продолжительностью ливней в июне–июле и наибольшей — в весенние и осенние месяцы. Изменение продолжительности сильных дождей в течение года связано со сменой типов циклонической деятельности по сезонам. Изменчивость продолжительности ливня внутри года имеет обратный ход. Следует отметить, что внутри рассматриваемой территории продолжительность дождя практически не связана с суммой осадков за ливень (см. таблицу).

Для оценки распределения осадков внутри расчетного единичного ливня, имеющего заданную продолжительность, сумму осадков, предельную интенсивность и характеризующегося теоретической кривой редукции (средней интегральной кривой нарастания суммы осадков), сегодня используется несколько подходов.

В случае паводкоформирующих ливней Урала использован метод схематизации, предложенный И.И. Галактионовым [12], с использованием типизации И.А. Шикломанова [14]. По исследованиям 150 выдающихся ливней Урала установлено, что форма профиля ливня практически не зависит от месяца года и географического положения метеостанции, и в целом для территории Урала наиболее характерны (в 70 % случаев) ливни 1-го типа по типизации И.А. Шикломанова [14]; ливни 2-го и 3-го типов встречаются в 25 % случаев; ливни с равномерным распределением осадков внутри дождя — менее чем в 5 % случаев.

На основании полученной модели внутригодового распределения характеристик ливня выполнено стохастическое моделирование ливней за 80 лет по данным метеостанций Екатеринбург, Красноуфимска и Туринска. При моделировании авторы исходили из стационарности и статистической однородности параметров временных рядов и положения о том, что рассматриваемые характеристики распределены по логнормальному закону.

Выполнено сопоставление расчетной интенсивности за 5-минутные интервалы по всем наблюдаемым ливням с данными об интенсивности, полученными в результате фактических наблюдений. Переход от интенсивности за 5-минутный интервал к другим временным интервалам осуществляется на основе уравнения (1), в котором параметры S_p , % и n являются устойчивыми для заданной метеостанции (иными словами, интенсивность осадков за 5 мин линейно связана с интенсивностью осадков за интервалы любой другой продолжительности, что справедливо как для рядов, полученных на основе обработки данных фактических наблюдений, так и для смоделированных рядов) [15].

В ходе моделирования количество ливней за 60 лет наблюдений равно 691, их средняя продолжительность — 472 мин, а средняя величина максимальной интенсивности за 5-минутный интервал — 0,71 мм/мин. Сопоставление фактической и смоделированной кривых распределения максимальной интенсивности за 5-минутный интервал, по данным наблюдений метеостанции Красноуфимска (рис. 2), показывает их удовлетворительную сходимость в верхней части (т. е. при обеспеченности менее 10 %, что и представляет интерес в расчетах паводочного стока). Расхождение кривых в средней части обусловлено тем, что фактические ряды данных по интенсивности ливня не независимы и удовлетворительно могут быть описаны посредством усеченных кривых, тогда как для смоделированного по теоретическому логнормальному закону ряду усечение не требуется. Статистические параметры расчетного ряда (для 5-минутных интервалов) — норма 0,60 мм/мин, $C_v = 0,63$; статистические параметры смоделированного ряда — норма 0,71 мм/мин, $C_v = 0,68$. Для сравнения приведем параметры рядов других временных интервалов. Для интенсивности ливня за 20 мин статистические параметры расчетного ряда — норма 0,53 мм/мин, $C_v = 0,66$; смоделированного ряда — норма 0,55 мм/мин, $C_v = 0,68$. Для интенсивности ливня за 60 мин статистические параметры расчетного ряда — норма 0,33 мм/мин, $C_v = 0,53$; смоделированного ряда — норма 0,7 мм/мин, $C_v = 0,58$.

Из сказанного выше видно, что параметры, описывающие кривые распределения, которые выбраны для аппроксимации наблюдаемых и смоделированных рядов, близки между собой, что подтверждает однозначность связей между параметрами интенсивности ливня, описываемыми уравнением (1).

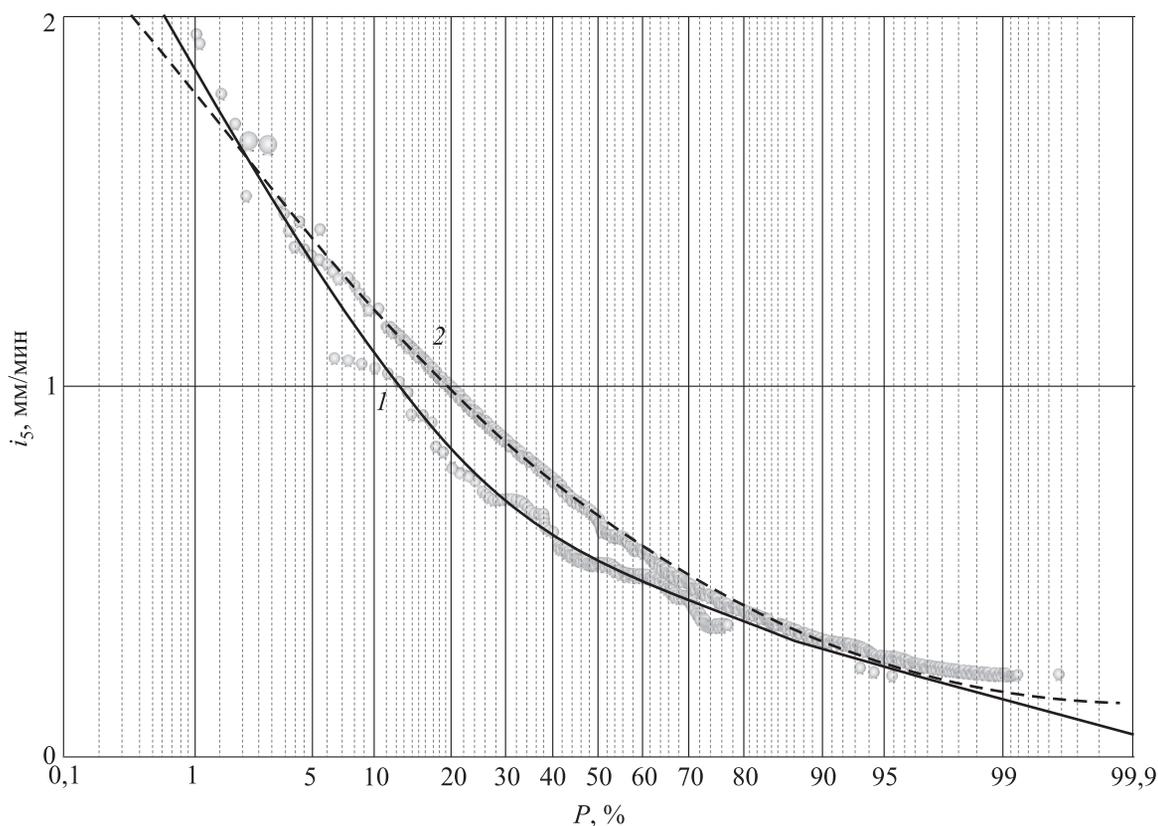


Рис. 2. Сопоставление наблюдаемой (1) и смоделированной (2) кривых распределения максимальной интенсивности ливня за 5-минутные интервалы по данным наблюдений метеостанции Красноуфимск.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам исследования основных закономерностей распределения ливневых осадков внутри года разработана методика детерминированно-стохастического моделирования ливней, опробованная на ряде метеостанций и показавшая удовлетворительные результаты. На основании методики авторам удалось смоделировать характеристики ливней внутри года (количество, сумму осадков и их продолжительность за каждый ливень).

Перспективы развития метода моделирования внутригодового и внутрисуточного хода ливня связаны с привлечением данных метеорологических радиолокаторов по площадям орошения интенсивными осадками и скорости передвижения облачных масс. Скорость перемещения истощающихся по пути движения участков выпадения осадков над наземными осадкомерами во многом зависит от изменения интенсивности ливня и его профиля в неподвижной точке местности. Увязка отражательной способности облаков и данных наземной сети наблюдений позволит более определенно подходить к расчетам характеристик ливневых осадков и, следовательно, к прогнозированию и расчету гидрографов стока дождевых паводков на малых реках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опасные** явления погоды на территории Сибири и Урала: Справочник специалиста. Ч. 3: Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области и Башкирская АССР / Под ред. С.Д. Кошинского, А.Д. Дробышева. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 200 с.
2. **Стулов Е.А.** Оценка орографического увеличения жидких осадков над мезомасштабными неоднородностями рельефа // Метеорология и гидрология. — 1997. — № 5. — С. 27–35.
3. **Богомазова З.П., Петрова З.П.** Характеристики выдающихся дождей на территории Центральных Черноземных областей // Труды ГГИ. — 1949. — Вып. 14 (68). — С. 95–123.

4. Калинин Н.А., Фрик Л.В., Смирнова А.А. Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков // Геогр. вестн. — 2008. — № 2. — С. 187–195.
5. Хргиан А.Х. О влиянии Уральского хребта на облачность и осадки // Метеорология и гидрология. — 1961. — № 3. — С. 10–17.
6. Галактионов И.И. Анализ закономерностей выпадения жидких осадков и их расчетные характеристики на территории Северо-Запада ЕТС // Тр. Ленингр. гидрометеоролог. ин-та. — 1972. — Вып. 47. — С. 80–98.
7. Усанкин А.А. О построении расчетной модели паводкоформирующих осадков // Тр. Ленингр. гидрометеоролог. ин-та. — 1975. — Вып. 55. — С. 56–68.
8. Клименко Д.Е., Епончинцева Д.Н. Оценка параметров кривых редукции ливневых осадков и формулы предельной интенсивности для территории Среднего Урала // Вестн. Казах. нац. ун-та. Сер. геогр. — 2015. — № 1 (40). — С. 87–91.
9. Hopkins L.C., Holland G.J. Australian heavy-rain days and associated east coast cyclones: 1958–1992 // Journ. of Climate. — 1997. — Vol. 10. — P. 621–635.
10. Rauscher S.A., Seth A., Liebmann B., Qian J.-H., Camargo S.J. Regional climate model — simulated timing and character of seasonal rains in South America // Monthly Weather Review. — 2007. — Vol. 135. — P. 2642–2657.
11. Sun Y., Solomon S., Dai A., Portmann R.W. How often will it rain? // Journ. of Climate. — 2007. — Vol. 27. — P. 4801–4818.
12. Галактионов И.И. Метод типизации дождей по показателю симметрии (на сетевых материалах Северо-Западного УГМС) // Тр. Ленингр. гидрометеоролог. ин-та. — 1975. — Вып. 55. — С. 48–55.
13. Соловьёва Н.Н. Статические характеристики и типизации дождей в бассейне Верхнего Амура // Труды Ленингр. гидрометеоролог. ин-та. — 1969. — Вып. 35. — С. 133–139.
14. Шикломанов И.А. Приближенный метод расчета ливневых паводков на малых неизученных водотоках степной и лесостепной зон ЕТС с использованием электронно-моделирующего устройства // Тр. ГГИ. — 1968. — Вып. 163. — С. 126–148.
15. Клименко Д.Е., Корепанов Е.П., Епончинцева Д.Н. Методика расчета максимального стока дождевых паводков малых рек на основе информации о редукции ливневых осадков на территории Свердловской области // Инженерные изыскания. — 2016. — № 5–6. — С. 14–20.
16. Алексеев Г.А. Схема расчета максимальных дождевых расходов по формуле предельной интенсивности стока с помощью кривых редукции осадков и стока // Тр. ГГИ. — 1966. — Вып. 134. — С. 72–79.

Поступила в редакцию 10.05.2017

После доработки 12.07.2017

Принята к публикации 02.04.2019