

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 556.166.2;556.121.6

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ ДОЖДЕВЫХ ОСАДКОВ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕГО УРАЛА)¹

© 2020 г. Д. Е. Клименко*

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, 614990 Россия

*e-mail: listopad19531@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2019 г.

После доработки 06.08.2019 г.

Принята к публикации 12.11.2019 г.

Рассмотрены способы оценки максимально возможных за сутки ливневых осадков Среднего Урала на основе совместного использования наземной, аэрологической, спутниковой и радиолокационной информации. Рассматриваемые способы оценки представляют собой альтернативу статистическим методам расчета. Оценка МВОС проводится на основе общего влагосодержания облачных систем, описываемого с позиций их стационарности или динамики во времени. Рассмотрены способы оценки влагосодержания на основе характеристик вертикального распределения температуры в тропосфере; скорости конвекции; высоты верхней границы облаков. Расчетные величины максимально возможных ливневых осадков, определенные для условий неизменного или облаками влагосодержания, сопоставлены с максимумами, определенными статистическим методом Хершфилда. Предельные максимумы, определенные физическими методами, близки к величинам вероятности превышения 0.01–0.001%, определенным с использованием логнормального распределения. Методика оценки предельных максимумов ливневых осадков может быть использована в инженерной практике.

Ключевые слова: Probable Maximum Precipitation, максимально возможные осадки, ливневые осадки, предельный максимум осадков, общее влагосодержание облаков, скорость конвекции, расчеты паводочного стока, предельный максимум стока.

DOI: 10.31857/S0321059620040069

ВВЕДЕНИЕ

Аппарат математической статистики в расчетах максимально возможных сумм дождевых осадков (МВОС), или РМР (Probable Maximum Precipitation) различной продолжительности в России и ряде стран мира используется в безальтернативном виде. В то же время генезис ливней предполагает наличие физически обоснованного предела влагосодержания конвективных облаков (в английской терминологии TPW – Total Precipitable Water) и предела интенсивности выпадения жидких осадков за различные временные интервалы. Этот предел определяется особенностями климата исследуемых регионов – такими, как предельная высота верхней границы тропосферы (ВГТ) и максимальная скорость конвекции в облаках вертикального развития.

Методы оценки МВОС достаточно подробно освещены в современных исследованиях, в том числе доведены до уровня практических рекомендаций [16, 22–24]. Входными параметрами расчетных моделей в большинстве случаев выступают эмпирические данные наземных или радиозондовых наблюдений. Внедрение в практику определения РМР радиолокационных и спутниковых данных является прерогативой последнего десятилетия; методические приемы внедрения данной информации в расчеты предельных максимумов дождевых осадков в настоящее время находятся в стадии разработки. В представленной статье описываются способы расчета МВОС на основе физических методов с использованием параметров, определяемых по данным метеорологического лоатора и космического спутника. Рассчитанные предельные максимумы сопоставлены с расчетами по методу Хершфилда.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-0044.

В качестве района исследований выбрана территория, находящаяся в 200-километровом радиусе обзора МРЛ Кольцово (Екатеринбург), в который попадают несколько метеорологических станций, использованных авторами в исследованиях радиолокационных методов оценок интенсивности ливневых осадков [7, 8, 10–12, 20]. Ранее были установлены параметры редукции ливневых осадков данного района по времени и по площади, характеристики распределения количества ливней, сумм осадков и их продолжительности по месяцам теплого периода. Результаты этих исследований использованы в статье для приведения расчетных предельных максимумов осадков к единым временным интервалам.

ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСА

МВОС представляют собой наибольшую сумму осадков за период заданной продолжительности, которая физически возможна в определенном географическом районе и в определенное время года [22]. Эта величина используется в расчетах вероятного максимального паводочного стока (РМФ) с 1950-х гг., когда в США, Китае, Индии и Австралии были разработаны и внедрены в практику методы оценки МВОС [16, 21–24]. В отечественной инженерной практике оценка МВОС до настоящего времени не производится.

Существующие в мире методы оценки МВОС можно разделить на три группы.

1. Групповой метод, базирующийся на анализе многолетних рядов наблюдений за ливневыми осадками по нескольким пунктам в одном географическом районе. В данную группу входит широко известный метод Хершфилда. Определение МВОС по методу Хершфилда базируется на построении для группы метеорологических станций региональной зависимости: $K_m = f(1/Cv_{n-1})$, где K_m – коэффициент, определяемый для каждого временного ряда максимальных в году суточных сумм осадков; Cv_{n-1} – коэффициент вариации временного ряда $n - 1$ (ряда n , из которого исключено одно максимальное наблюдаемое значение). Величина K_m определяется так:

$$K_m = \frac{(X_m - \bar{X}_{n-1})}{Cv_{n-1} \bar{X}_{n-1}}, \quad (1)$$

X_m – первый член в упорядоченном n -летнем ряде наблюдений за осадками, т.е. имеющий максимальное значение; \bar{X}_{n-1} – среднее по ряду длиной $n - 1$, т.е. за исключением максимального значения X_m . МВОС ($X_{\text{РМР}}$) для каждой метеостанции определяются путем решения уравнения (1) для X_m относительно K_m , определяемого по указанной региональной зависимости, а также параметров \bar{X}_n и Cv_n , определенных с учетом наблюдаемого

максимума, в виде: $X_{\text{РМР}} = (K_m Cv_n + 1) \bar{X}_n$. Количество привлекаемых к анализу метеостанций не оговорено в [19, 22], но должно обеспечивать построение региональной зависимости со средней квадратической ошибкой, не превышающей точности измерений.

2. Статистический метод основан на анализе временных рядов данных об осадках в пунктах наблюдений с привлечением различных статистических распределений, позволяющих определить величины осадков редкой повторяемости.

3. Физические методы оценок МВОС опираются на генезис формирования влаги в облаках и предполагают максимизацию общего влагосодержания атмосферы – т.е. определения коэффициента отношения максимального наблюдаемого (вычисленного) влагосодержания к максимальному возможному [22, 23], оцениваемого на основе данных дистанционных или аэрологических наблюдений, или оценку генерации влаги конвективными облаками [2, 3]. Входные расчетные параметры для рассматриваемых методов – вертикальный профиль температуры и влажности от поверхности земли до верхней границы облаков (ВГО). Как правило, метод Хершфилда [19] применяют в качестве альтернативы двум другим методам.

Предельные максимумы, определенные физическими методами рядом исследователей, близки к величинам вероятности превышения 0.01–0.001% [18, 21, 25].

Задача расчета сумм выпавших сильных дождевых осадков (сумма осадков за 12 ч превышает 15 мм) на основе данных о неустойчивости конвективных облаков до сих пор не имеет однозначного решения в мировой практике [1–3]. В России осадки определяются в рамках двух глобальных моделей, региональной модели, нескольких вариантов модели WRF (Weather Research and Forecasting), мезомасштабной модели Гидрометцентра России и модели COSMO-Ru (international Consortium for Small-scale atmospheric MOdeling in Russia). Основные параметры для оценки неустойчивости – высота верхней границы облаков и фактическое влагосодержание, определяемое по данным радиолокации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка МВОС выполнена на основе трех источников входных данных (инструментальные данные наземных и аэрологических наблюдений, данные метеорологического радиолокатора и спутниковые данные).

В качестве фактических материалов для исследований использованы данные аэрологических наблюдений по метеостанциям Верхнее Дуброво и Ивдель за период 1934–2018 гг., данные срочных

метеорологических наблюдений по метеостанции (МС) Екатеринбург (1961–2018), Верхнее Дуброво (1961–2015), Златоуст (1961–2018), Красноуфимск (1961–2018) и данные радиолокационных наблюдений (высота радиоэха и отражательная способность облаков) за каждые 30 мин по МРЛ Кольцово (2004–2017 гг.). Для оценки МВОС методом Хершфилда проанализированы ряды наблюдений над суточными максимумами осадков по 213 метеорологическим станциям и постам Уральского УГМС за весь период наблюдений (с 1880 по 2019 гг.) [8, 10].

Фактическая высота ВГО в даты выпадения максимизируемых ливней для ряда метеостанций определена по данным трех источников: спутниковых данных (СТН – Cloud top height EDR Polar orbiting satellites CM SAF baseline area (30° с.ш. – 80° с.ш., 60° з.д. – 60° в.д.); сетка 15 × 15 км), данных о высоте радиоэха МРЛ Кольцово и аэрологических данных (аэрологические диаграммы).

Расчет МВОС выполнен с использованием двух методик: ВМО (оценка суммы ливневых осадков при максимальном влагосодержании столба атмосферы – TPW) и Гидрометцентра России (методика оценки максимальной конвективной скорости в облаках вертикального развития). Метод Хершфилда рассмотрен как альтернатива двум физическим методам.

Расчет МВОС на основе общего влагосодержания облаков (TPW)

В соответствии с методикой ВМО [4, 22], из многолетних рядов срочных значений температуры точки росы выбирается ее максимальное за период наблюдений значение за 12 ч (при 8-срочных наблюдениях – максимальное из четырех непрерывных сроков). По этому значению определяется TPW, и предполагается, что вся влага выпадает в виде осадков. Из многолетнего ряда срочных наблюдений за суммами ливневых осадков за весь период выбираются максимальное значение суммы осадков и соответствующее ему фактическое значение температуры точки росы, на основе которого определяется фактическое TPW. МВОС рассчитывают по формуле:

$$P_{\max} = P_S \frac{TPW_{\max}}{TPW_S}, \quad (2)$$

где P_{\max} – максимально возможная сумма осадков (МВОС), мм; P_S – сумма осадков, выпавшая во время наблюдаемого максимального ливня, мм (наибольшая наблюденная сумма осадков за 12 ч – т.е. за один срок наблюдений при двух сроках в течение суток или сумма за 2 срока при наличии четырех сроков в течение суток); TPW_{\max} – максимально возможное влагосодержание в столбе атмосферы в данном пункте; TPW_S – влагосодер-

жание в столбе атмосферы во время наблюдаемого максимального ливня. В [22] приведены величины влагосодержания атмосферного воздуха, заключенного между определенными изобарическими поверхностями в зависимости от температуры точки росы у земли.

Расчет МВОС выполнен по модифицированной автором методике ВМО. Суть модификации заключалась в том, что высота верхней границы облаков не задавалась произвольно, а принималась по одному из источников; а величина TPW в слое облачности не определялась по таблицам [22], а рассчитывалась на основе вертикального профиля распределения температуры и значений температуры точки росы у земли. Данный профиль может быть определен на основе как радиозондовых данных, так и измерения отраженного земной поверхностью излучения, верхней границей облаков, а также излучения, поглощенного атмосферным водяным паром, с использованием активных спутниковых датчиков, подобными RADAR [17]. Математически величина TPW_S (кг/м², мм, 1 кг/м² = 1 мм) столба атмосферного воздуха единичной площади может быть определена путем интегрирования абсолютной влажности воздуха по высоте:

$$TPW_S = \frac{1}{\rho g} \int_{P_1}^{P_2} q dp, \quad (3)$$

где q – абсолютная влажность, г/кг, слоя влажного воздуха; P_1 и P_2 – высота изобарических поверхностей, соответствующих нижней и верхней границам облачности, гПа; g – ускорение силы тяжести, см/с²; ρ – плотность воды, равная 1 г/см³. В реальных ливнях количество осадков часто превышает расчетную величину TPW. Это происходит из-за конвергенции внутри конвективных облачных комплексов [6]. Тем не менее существует общая корреляция между количеством осадков и величиной полного влагосодержания.

Верхний предел влагосодержания тропосферы может определяться абсолютной максимальной высотой ее верхней границы (ВГТ). Для рассматриваемой территории (Средний Урал) максимально возможная в июле (в период формирования экстремальных дождевых осадков) высота ВГТ составляет 13.14, а минимальная – 6.85 км [13]. Нижний предел влагосодержания определяется высотой нижней границы облаков, которая может быть установлена либо на основе непосредственных измерений высоты облаков на метеостанциях, либо путем анализа аэрограмм.

Важнейшей характеристикой в расчетах профиля удельной влажности по высоте является точка росы. Температура точки росы T_p на поверхности земли и в облачных слоях определена

на основе эмпирической формулы, выведенной автором в аналитическом виде на основе психрометрического графика:

$$T_p = \frac{233.77 \ln\left(\frac{RH}{100} \exp\left(\frac{16.57T - 115.72}{233.77 + 0.997T}\right)\right) + 115.72}{16.57 - 0.997 \ln\left(\frac{RH}{100} \exp\left(\frac{16.57T - 115.72}{233.77 + 0.997T}\right)\right)}, \quad (4)$$

где T – температура, °C; RH – относительная влажность воздуха, %.

Облачность на аэрологических диаграммах определяется минимальными значениями дефицита T_p (как правило, <3°) [15]. Абсолютная влажность воздуха (г/м³) в расчетах TPW определяется на основе плотности влажного воздуха путем решения уравнения Клапейрона–Менделеева:

$$\rho_{\text{steam}} = \frac{Mp_{(\text{H}_2\text{O})}}{R(T + 273.15)}, \quad (5)$$

где M – молярная масса воды, равная 18.01528 г/моль; $p_{(\text{H}_2\text{O})}$ – парциальное давление паров воды в воздухе, гПа; R – универсальная газовая постоянная, равная 8.3144598(48) Дж/(моль К); T – температура, °C.

Величина парциального давления газовой смеси вычислена на основе данных об относительной влажности воздуха ϕ и давления насыщенного пара p_{sat} как функции от температуры по уравнению Магнуса–Тетенса:

$$p_{(\text{H}_2\text{O})} = p_{\text{sat}} \frac{\phi}{100} = 6.112e^{\frac{17.67T}{T+243.5}} \frac{\phi}{100}, \quad (6)$$

где T – температура, °C; или по данным психрометрических таблиц.

Плотность сухого воздуха (кг/м³) на изобарической поверхности может быть определена так:

$$\rho = \frac{pM}{R(T + 273.15)}, \quad (7)$$

M – молярная масса, равная 29 г/моль для сухого воздуха; p – абсолютное давление, гПа; T – температура, °C. Отсюда, абсолютная влажность воздуха q – отношение массы воды к массе сухого воздуха в равновеликом объеме, г/кг:

$$q = \frac{\rho_{\text{steam}}}{\rho}. \quad (8)$$

Расчет МВОС на основе скорости конвекции в облачных системах

Входными параметрами для определения МВОС на основе скорости конвекции в облаках, определяемой по методике Гидрометцентра РФ [2, 3], послужили экспериментальные данные пювио-

графических наблюдений об интенсивности и количестве осадков и данные о верхней границе кучево-дождевых облаков к моменту начала выпадения осадков, измеренные с помощью метеорологического радиолокатора (МРЛ). Интенсивность осадков $I(t)$ (мм/мин) из крупномасштабных облачных систем определяется согласно [3]:

$$I(t) = 0.024W_m \frac{\Delta t_{\text{л}}}{\Delta t}, \quad (9)$$

где W_m – максимальная скорость конвекции, м/с; $\Delta t_{\text{л}}$ – продолжительность выпадения ливневого дождя, мин; Δt – общая продолжительность дождя, мин. В соответствии с [3], конвективная облачная система включает облака (ячейки), внутри которых происходит генерация влаги (конвективные облака), а также облака других типов, т.е. влагосодержание облака не является постоянной во времени величиной. Коэффициент генерации осадков, характеризующий отношение суммы фактически выпавших осадков к общему количеству генерируемой облаком влаги, зависит от продолжительности выпадения ливневого дождя $\Delta t_{\text{л}}$, определяется выражением:

$$k_0 = 0.0055\Delta t_{\text{л}}. \quad (10)$$

При продолжительности ливня $\Delta t_{\text{л}} = 180$ мин, что соответствует времени между сроками метеорологических наблюдений, коэффициент генерации k_0 принимает значение 1. Таким образом, принимая, что в предельном случае вся облачная система является конвективной, продолжительность ливня равна общей продолжительности дождя ($\Delta t_{\text{л}} = \Delta t$), максимальная интенсивность осадков может быть определена из (9) так:

$$I(t = 180) = 0.024W_m, \quad (11)$$

а сумма осадков:

$$P(t = 180) = I\Delta t = 0.024W_m\Delta t_{\text{л}} = 0.024W_m \frac{k_0}{0.0055} = 4.36W_m, \quad (12)$$

где $P(t)$ – количество осадков из крупномасштабной облачной системы, мм.

Коэффициент генерации осадков зависит от горизонтального и вертикального масштаба облачности и достигает наибольших значений в облачности циклонов, а наименьших – во внутримассовой облачности [1]. Разные его значения для разных типов облачности, по-видимому, связаны с разными размерами конвективных ячеек, характерных для облачности, из которой выпадают осадки. В случае оценок МВОС коэффициент генерации принят равным 1 (предельное значение).

Для расчета максимальной скорости конвективного потока в облаках за период радиолокационных наблюдений использована следующая информация: максимальная радиолокационная от-

Таблица 1. Сравнительная характеристика высоты облаков по данным спутника, радиолокатора и аэрологическим данным

Дата	Температура воздуха, °С	Температура точки росы, °С	Высота верхней границы облаков, м		
			по данным МРЛ Кольцово	по данным полярного орбитального спутника	по аэрологическим данным
Верхнее Дуброво					
13.07.2010	15.6	15.6	7000	6000	5600
13.06.2014	20.9	15.0	7500	7200	6000
Екатеринбург					
04.07.2003	18.1	17.0	7000	6300	6000*
05.08.2007	22.0	18.2	9500	5000	5000*
Ивдель					
01.08.2013	14.9	13.8	н/д	8000	5600
26.07.2013	15.0	15.0	н/д	6500	11300
Красноуфимск					
30.06.2015	18.8	17.6	12000	8000	н/д
15.07.2011	16.5	16.2	8500	8500	н/д

* По МС Верхнее Дуброво.

ражаемость dBZ (децибелы относительно Z; логарифмическая безразмерная техническая единица, используемая в радарной метеорологии) в радиусе обзора МРЛ Кольцово за период с 2008 по 2018 г. и высота верхней границы радиоэха кучево-дождевой облачности H_m , км. Вопрос о достаточности периода наблюдений в настоящее время остается открытым и требует специального изучения, поскольку в подавляющем большинстве случаев данные МРЛ в России закрыты для научных исследований. Максимальная конвективная скорость рассчитывалась по соотношению (13) [14]:

$$W_m = 1.33[0.038H_m(\text{dBZ} - 18) + 3.52] + 4. \quad (13)$$

Расчетная величина конвективной скорости согласуется со значениями, определяемыми по данным радиозондирования атмосферы [1].

Переход от сумм осадков за 3 ч P_{180} к предельным суммам осадков за сутки P_{1440} выполнен на основе редуцированных зависимостей интенсивности осадков по времени [8]:

$$P_{1440} = \frac{P_{180}}{(180 + 1)^{1-n}} (1440 + 1)^{1-n} = 8^{1-n} P_{180}, \quad (14)$$

n – показатель степени, характеризующий редуцицию интенсивности дождя от его продолжительности. Расчет суммы осадков за некалендарные сутки (1440 мин) выполнен для условия максимальной наблюдаемой продолжительности непрерывного дождя (с интенсивностью в центральной части ливня >0.2 мм/мин), для всех метеостанций Урала за период 1936–2015 гг. равной 1600 мин [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ключевое значение в расчетах МВОС приобретает расчет TPW, зависящий от точности определения предельной высоты ВГО. Для дат, соответствующих наибольшему суммарному ливневым осадкам за 12 ч, определены значения ВГО. Оценки высоты ВГО для анализируемых ливней представлены в табл. 1. Оценка высоты ВГО по аэрологическим диаграммам выполнена на основе резкого изменения с высотой дефицита точки росы (на изобарической поверхности 550 гПа признак отсутствия облаков – дефицит точки росы $>2.4^\circ$). Высота ВГО оценена по ежедневным данным полярных спутников; при использовании данных МРЛ Кольцово за период с 2004 по 2018 г. – по высоте радиоэха.

Расчет TPW в атмосфере выполнен на основе методики ВМО [22], так и непосредственного расчета вертикального профиля температуры по данным аэрологических, спутниковых и радиолокационных наблюдений. Результаты расчетов по методике ВМО представлены в табл. 2. Максимизация выполнялась для нескольких наибольших сумм осадков за период наблюдений. Результаты оказываются достаточно близкими между собой, однако установлено, что чем ниже сумма осадков максимизируемого ливня – тем выше оценочная величина РМР. Вероятно, это связано со снижением корреляционной связи между величинами влагосодержания и суммами осадков при уменьшении величин последних.

Для вычисления максимальной скорости конвекции за 3 ч высота облаков (высота радиоэха) принята равной высоте ВГТ – 13.14 км. Макси-

Таблица 2. Результаты расчета предельного максимума осадков на основании максимизации предельного влаго-содержания столба атмосферного воздуха

Дата время Гринвич	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Давление у земли, гПа	Высота верхней границы облаков, м	Т _{верх.} границы облаков, °С	Т точки росы, °С	Абсолютная влажность у земли		Влагодержание облака расчетное, мм	Влагодержание облака по аэрологическим данным, мм	Сумма осадков, мм		
							г/м ³	г/кг			Фактическая за 3 ч, мм	Расчетный предельный максимум за 3 ч, мм	Расчетный предельный максимум за 24 ч, мм
Верхнее Дуброво													
06.07.1974	30.5	59	971.8	14000	-60.5	21.6	18.4	1.6	101		осадков нет*		
21.07.1967	11.9	98	974.1	14000	-79.1	11.6	10.4	0.9	66	н/д	85.4	131	301
13.07.2010	15.6	100	970.6	8500	-39.8	15.6	13.3	1.1	55	34.4	36.9	115	266
13.06.2014	20.9	69	966.7	8500	-19.9	15.0	12.6	1.1	29	31.0	47.9	196	451
Екатеринбург													
02.07.1981	28.8	69	972.6	14000	-62.2	22.5	19.6	1.7	113		осадков нет*		
22.07.1983	13.3	96	967.4	14000	-77.7	12.7	11.1	0.9	70	н/д	83.3	133	308
04.07.2003	18.1	93	973.1	7000	-27.4	17.0	14.4	1.2	44	30.8	40.0	102	234
05.08.2007	22.0	79	983.2	4000	-10.0	18.2	15.3	1.3	27	35.6	25.8	109	251
Златоуст													
23.06.1985	26.5	81	951.5	14000	-64.5	23.0	20.3	1.8	115		осадков нет*		
13.07.1966	14.7	94	950.2	14000	-76.3	13.7	11.8	1.0	71	н/д	61.9	101	233
03.07.1974	19.0	89	945.7	14000	-72.0	17.1	14.5	1.3	85	н/д	51.0	70	160
09.06.2006	15.7	95	955.4	6500	-26.6	14.9	12.7	1.1	34	н/д	38.2	130	299
Ивдель													
01.08.1998	29.1	80	1007	14000	-61.9	25.3	23.2	2.0	137		осадков нет*		
01.08.2013	14.9	93	1001	12000	-63.1	13.8	11.9	1.0	60	35.7	74.5	171	394
26.07.2013	15.0	100	993	9300	-45.5	15.0	12.8	1.1	51	29.5	47.9	129	298
14.08.1988	15.2	88	989	9150	-44.3	13.2	11.4	0.9	43	20.2	44.7	143	330
Красноуфимск													
24.07.1971	30.9	72	997.2	14000	-60.1	25.3	23.0	2.0	131		осадков нет*		
19.06.1973	16.6	96	986.9	14000	-74.4	16.0	13.6	1.1	84	н/д	61.2	96	221
30.06.2015	18.8	93	984.2	9500	-43.0	17.6	15.0	1.3	59	н/д	36.9	82	189
15.07.2011	16.5	98	984.8	5500	-19.3	16.2	13.8	1.2	34	н/д	41.9	162	374

* Даты с пометкой “осадков нет” соответствуют датам наибольших значений температуры точки росы у земли в течение 12 ч; в эти даты за период наблюдений жидкие осадки отсутствовали.

мальная зафиксированная средняя по высоте радиолокационная отражаемость в радиусе МРЛ Кольцово – 50 dBz (предельное значение, фиксируемое МРЛ-5). При этом максимально возможная величина конвективной скорости по формуле (13) при предельных значениях высоты ВГТ и отражаемости составляет $W_m = 29.7$ м/с. При этом величина предельного максимума интенсивности осадков за 3 ч в соответствии с (11) для

МС Екатеринбург $I(t) = 0.71$ мм/мин, а МВОС в соответствии с (12) – 129 мм.

Для перехода от трехчасовых величин к суммам осадков за ливень любой продолжительности использованы результаты исследований авторов по предельной продолжительности ливня и по коэффициенту редукиции ливня в пространстве. Как установлено авторами в [8], между интенсивностью дождей за интервалы времени и их про-

Таблица 3. Результаты расчета предельного максимума осадков на максимальной скорости конвекции (жирные линии – знак дроби)

Метеостанция	Период наблюдений за ливнями	Максимальная наблюдаемая интенсивность ливня, мм/мин	Максимальная наблюдаемая интенсивность ливня $i(t)_{\max}$ (числитель) и сумма осадков (знаменатель) за временные интервалы в минутах		Коэффициент редукции ливня по времени (по МИГ)	Ливневые параметры метеостанций (по МИГ)		Максимальная конвективная скорость, м/с	Предельная расчетная интенсивность ливня, мм/мин	Предельная расчетная интенсивность ливня (числитель) и сумма осадков (знаменатель) за временные интервалы в минутах	
			180	1440		<i>A</i>	<i>B</i>			180	1440
Верхнее Дуброво	1961–2014	14.4	<u>0.60</u> 109	<u>0.17</u> 245	0.61	–1.14	3.99	34.6	16.9	<u>0.83</u> 149	<u>0.23</u> 331
Екатеринбург	1961–2015	13.0	<u>0.71</u> 129	<u>0.22</u> 320	0.56	–1.55	3.58	34.6	15.1	<u>0.83</u> 149	<u>0.30</u> 432
Златоуст	1961–2014	13.3	<u>0.48</u> 85.9	<u>0.13</u> 182	0.64	–0.02	4.76	34.6	19.8	<u>0.83</u> 149	<u>0.22</u> 317
Ивдель	1961–2015	9.36	<u>0.22</u> 39.9	<u>0.05</u> 72.0	0.72	5.45	11.6	34.6	30.0	<u>0.83</u> 149	<u>0.19</u> 274
Красноуфимск	1961–2015	11.7	<u>0.32</u> 58.3	<u>0.08</u> 111	0.69	1.71	7.60	34.6	25.6	<u>0.83</u> 149	<u>0.20</u> 288

должительностью существует обратная зависимость:

$$I(t)_{P,\%} = S_{P,\%}/(t+1)^n, \quad (15)$$

$S_{P,\%}$ – предельная (мгновенная) интенсивность дождя при продолжительности $t \rightarrow 0$, зависящая от вероятности превышения один раз в N лет (величина N связана с обеспеченностью P , %, соотношением $N = 100/P$); n – то же, что в (14). По исследованиям авторов, для радиуса МРЛ Кольцово (Екатеринбург) n принимает значение от 0.56 до 0.72. При вычисленной $I(t = 180) = 0.71$ мм/мин величина S принимает значения от 13.0 до 30.0 мм/мин. Учитывая, что $S_{P,\%} = A + B \lg(N)$ [8] (A и B – постоянные для расчетной метеостанции ливневые (дождевые) параметры; N – то же, что в (15)), при заданных ливневых параметрах (например, для Екатеринбурга $A = -1.55$ и $B = 3.58$) вероятность превышения $P\%$, соответствующая предельной интенсивности, определяется так:

$$P_{\%} = \frac{100}{10^{\frac{S_{P,\%}-A}{B}}}. \quad (16)$$

Величины предельных интенсивностей и суточных сумм осадков в этом случае близки к значениям с вероятностью превышения 1 раз в 1000–100000 лет (0.1–0.001%). По данным [8], величина

S меняется от 9.36 до 15.1 мм/мин. Предельные величины суточных сумм осадков, вычисленные на основе наблюдаемой интенсивности $S_{\text{набл}}$ и предельной интенсивности, определенной по скорости конвекции на основе данных МРЛ $S_{\text{конв}}$, оказываются достаточно близкими (табл. 3). При том, что максимальная конвективная скорость за 3 ч принята постоянной для радиуса обзора МРЛ, максимальная интенсивность ливня и сумма осадков для анализируемых метеостанций за временные интервалы другой продолжительности оказываются разными, что определяется различными значениями параметров A и B [8]. Результаты расчетов по анализируемым метеостанциям представлены в табл. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе исследования выполнены оценки МВОС на основе двух принципиально различных методик: методика ВМО при оценке общего влагосодержания базируется на принципе его статичности в столбе атмосферного воздуха при предельных значениях высоты тропосферы и температуры точки росы, тогда как методика Гидрометцентра рассматривает столб атмосферного воздуха как динамическую систему, в которой действуют процессы конвекции и конвергенции, также достигающие предельных значений. Сопоставление результатов расчета МВОС за сут-

Таблица 4. Сравнительная характеристика предельных максимумов ливневых осадков за сутки

Метеостанция	Период наблюдений, лет	Высота, м	Характеристики наибольших в году суточных сумм осадков по данным наблюдений и их величина обеспеченностью $H_{0.001\%}$, мм				Расчетная предельная суточная сумма осадков, мм		
			норма	C_v	C_s/C_v	$H_{0.001\%}$	по скорости конвекции	по величине TPW	метод Хершфилда
Верхнее Дуброво	62	287	39.0	0.39	3.2	232	331	301	185
Екатеринбург	63	281	36.8	0.45	2.3	203	432	308	264
Златоуст	62	532	36.4	0.37	1.3	154	317	233	202
Ивдель	64	93	32.8	0.41	2.2	225	274	394	179
Красноуфимск	65	205	31.9	0.35	2.1	135	288	221	158

ки двумя методами показывает, что суточные максимумы отличаются друг от друга на величину от 9 до 33%. По анализируемым метеостанциям оценки МВОС, определенные через скорость конвекции, имеют большие значения по сравнению с оценками по методике ВМО. МВОС, определенные методом Хершфилда, на 14–70% ниже значений, определенных методом ВМО (и, соответственно, ниже значений, определенных через скорость конвекции). Рассчитанные с использованием соотношения (15) МВОС близки к статистически определенным величинам максимальных суточных сумм осадков обеспеченностью ~0.001% (табл. 4). Для расчета величин максимальных суточных осадков вероятностью превышения 0.001% использовано логнормальное (Кептейна) распределение, наилучшим образом аппроксимирующее временные ряды [12].

Классический метод Хершфилда в ряде зарубежных исследований используется для сопоставления результатов определения МВОС новыми способами; подобное сопоставление проведено в представленной работе. При анализе рядов максимальных в году суточных сумм ливневых осадков на Урале по 213 метеостанциям на территории деятельности Уральского УГМС Росгидромета впервые удалось установить зависимость вида $K_m = f(1/C_{v_{n-1}})$, характеризующуюся коэффициентом детерминации 0.74. На основе данной зависимости выполнены оценки МВОС методом Хершфилда (табл. 4). Результаты исследования показывают более высокие значения МВОС, определенных на основе физических подходов, по сравнению с величинами, полученными с использованием статистического подхода (метод Хершфилда); различия достигают 40–50. В зарубежных работах различия МВОС, определенные разными методами, разнонаправленны. Так, для территории Китая, по оценкам [24], МВОС по методу Хершфилда оказываются в 1.5–2.0 раза ниже в сравнении с величинами, определенными

физическим методом. По исследованиям для Малайзии [23], – соотношение обратное (МВОС, определенные физическими методами, в 1.7 раза выше величин, определенных физическим методом). Это может быть связано с климатическими особенностями изучаемых территорий, а также отсутствием единых подходов к выбору продолжительности и периода наблюдений (в представленном исследовании использованы периоды продолжительностью 25–100 лет, охватывающие временные ряды с 1880 по 2019 г.; в [24] – 15 лет, 1998–2013 гг.; в [23] – 10 лет, 1974–1983 гг. и т.д.). Следует полагать, что для сопоставимости оценок необходимы единые подходы к выбору продолжительности наблюдений, а сама продолжительность может соответствовать общепринятым рекомендациям ВМО в отношении использования единых 30-летних рядов наблюдений для определения статистических характеристик климата (1931–1960, 1961–1990, 1991–2020 гг.).

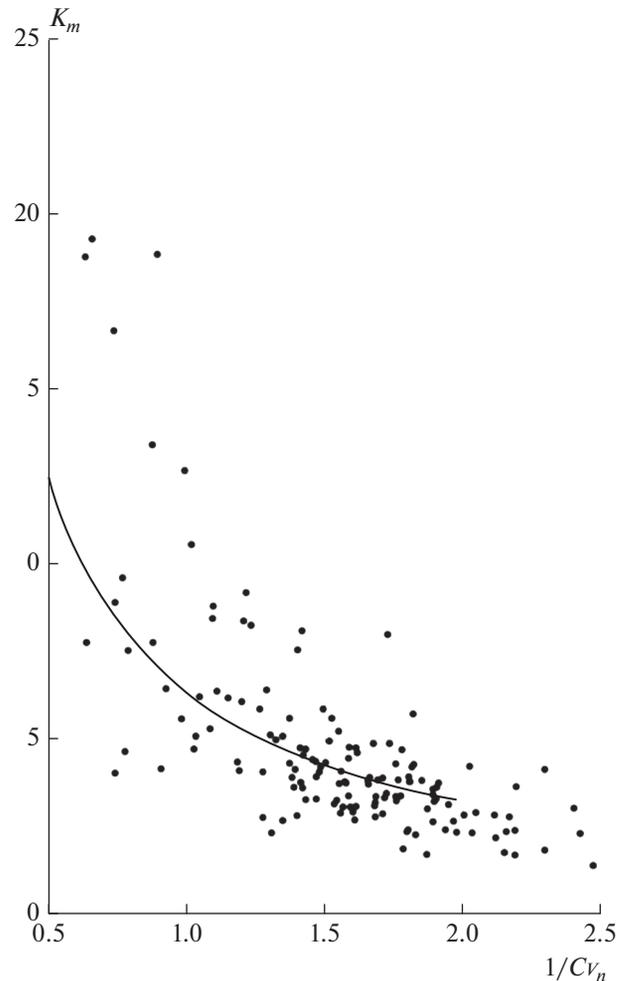
Поскольку концепция физического метода заключается в максимизации сумм осадков (определении МВОС на основе фактически наблюдаемого максимума и соотношений предельного и фактического максимального влагосодержания атмосферы) или расчете предельных конвективных скоростей, необходимо проведение детальных исследований факторов, определяющих величины TPW или конвективной скорости.

Расчет величины TPW представляет собой частную задачу в оценке МВОС, решение которой во многом зависит от определения максимальной наблюдаемой высоты верхней границы облаков (или верхней границы тропосферы – ВГТ) и, следовательно, температуры на этой границе. В представленном исследовании сделана попытка увязки данных о высоте ВГТ, получаемых на основе спутника, метеорологического локатора (МРЛ) и аэрологических диаграмм. Высоты ВГТ по двум последним источникам данных сопоставимы между собой (табл. 1). Высоты ВГТ

на основе данных МРЛ близки к характеристикам, определяемым на основе спутника или аэрологических наблюдений, только вблизи радара, а по мере удаления от него оказываются существенно завышенными. Этот эффект связан с преломлением радиолуча на больших расстояниях от радара в верхних слоях атмосферы [14]. Предельная высота верхней границы влагосодержания определяется предельной высотой ВГТ: для рассматриваемой территории — 13.14 км, тогда как высота максимальной наблюдаемой верхней границы облаков — 6.0–9.5 км. Следует полагать, что незначительное количество атмосферной влаги содержится в стратосфере и мезосфере, однако оценки степени участия этих слоев в формировании ливневых осадков отсутствуют.

Предельное значение конвективной скорости (скорости вертикальных движений воздуха) в облаках получено равным 34.6 м/с при предельных значениях высоты ВГТ и максимальной наблюдаемой (за весь период наблюдений, во всем радиусе обзора МРЛ и по всей высоте радиоэха) радиолокационной отражаемости (57 dBZ); подобные величины получены и в исследованиях [1–3]. В отношении предела радиолокационной отражаемости необходимо отметить, что сегодня он определяется техническими возможностями МРЛ и не может превышать 58 dBZ [14]. Именно этим пределом определяется расчет по соотношению (13). Максимальная отражаемость в вертикальном профиле облака (в диапазоне высот 4–6 км) соответствует области перехода его фазового строения с капельного на ледяное и области формирования грозных очагов [3]. При расчетах предельной скорости конвекции констатируется условие, когда смешанное водно-ледяное фазовое состояние соответствует всему вертикальному профилю облака, что физически невозможно. Таким образом, хотя вопрос оценки предельных значений радиолокационной отражаемости сегодня определяется техническими возможностями МРЛ, большей проблемой радарной метеорологии является оценка интегральных показателей отражаемости в вертикальном профиле облака. В то же время этот метод получения данных для оценки МВОС показывает близкие к другим методам результаты, методически отличается от метода ВМО и представляется перспективным для дальнейшего развития.

Несмотря на то, что оценка МВОС более обоснована с точки зрения физики процесса формирования атмосферной влаги, метод ВМО также имеет ряд модернизаций, учитывающих эффект конвергенции, влияние ветра при выпадении ливней, натурных оценок вертикального профиля влагосодержания и т.д. [24]. Например, по данным [16], величина МВОС за 24 ч (PMP_{24}) по методике ВМО определяется из соотношения



Зависимость коэффициента K_m от соотношения $1/Cv_n$ (для ливневых осадков продолжительностью 1440 мин).

$PMP_{24} = 3.85 \times P_{50\%} - 24.1$, где $P_{50\%}$ — средний многолетний суточный максимум осадков; с учетом влияния ветра — из соотношения $PMP_{24} = 1.91P_{50\%} - 20.3$. По данным [16], учет влияния ветра приближает оценки МВОС по методике ВМО к оценкам по методу Хепшфилда.

Дальнейшее развитие методов оценки МВОС, по мнению автора, должно предполагать разработку методов оценки влияния ландшафтов на физику атмосферных процессов, районирование территории по условиям выпадения осадков, развитие гидродинамических моделей, отражающих процессы влагооборота в облаках. Кроме того, для увязки расчетных МВОС с данными наземных наблюдений необходима выработка общих принципов оценки достаточной продолжительности рядов наблюдений над осадками, методов оценки стационарности рядов (в том числе сгруппированных внутри однородных районов). Кроме того, логично привлечение иной — не метеоро-

логической – информации (дендрохронологической, палеоклиматической), что позволит более обоснованно оценивать статистическими методами пределы физических величин МВОС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеева А.А., Глушкова Н.И.* Диагноз и прогноз интенсивной конвекции и связанных с нею опасных конвективных явлений // Тр. Гидрометцентра России. Вып. 326. 1993. С. 68–72.
2. *Алексеева А.А., Лосев В.М.* Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели гидрометцентра России // Тр. Гидрометцентра России. Вып. 351. Гидрометеорологические прогнозы. 2014. С. 30–45.
3. *Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Тр. Гидрометцентра России. Вып. 360. 2016. С. 135–148.
4. *Болгов М.В., Трубецкова М.Д.* Оценка максимальных возможных осадков для бассейна р. Зеи // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Сб. науч. Тр. посвящается году экологии в России и 50-летию ИВП РАН. Новочеркасск: Лик, 2017. С. 485–490.
5. *Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России // ВНИИ ГМИ МЦД. 2009. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (Дата обращения: 05.05.2019).
6. *Иванова А.Р.* Динамика внутритропической тропопавзы Северного полушария. Дис. ... док. физ.-мат. наук. М.: Гидрометцентр России, 2011. 119 с.
7. *Клименко Д.Е.* Исследование пространственной редукции ливней Урала на основе радиолокационной информации // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 78–91.
8. *Клименко Д.Е., Епончинцева Д.Н., Корепанов Е.П., Черепанова Е.С.* Исследование кривых редукции паводкоформирующих ливневых осадков Зауралья // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 76–89.
9. *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. 14–18.
10. *Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Габова Л.В., Шапова И.В.* Сравнительный статистический анализ данных наблюдений осадкомеров и плювиографов над характеристиками паводкоформирующих осадков Урала // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 91–99.
11. *Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Кузнецова Т.В.* Оценка и картографирование параметров внутригодового и внутрисезонного распределения паводкоформирующих ливней в бассейне реки Тобол // География и природ. ресурсы. 2019. № 3. С. 165–172.
12. *Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Кузьминых А.Ю.* Оценка параметров предельных распределений выборок, содержащих несколько событий в году, при расчетах экстремальных паводкоформирующих ливней // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 4. С. 438–446.
13. *Козлова Л.Ф., Стерин А.М.* Исследование многолетней изменчивости параметров тропопавзы над территорией РФ по радиозондовым данным // ВНИИ ГМИ МЦД". 2008. URL: <http://meteo.ru/126-trudy-vniigmi/trudy-vniigmi-mts-d-vypusk-178-2014-g/529-issledovanie-mnogoletnej-izmenchivosti-parametrov-tropopauzy-nad-territoriej-rf-po-radiozondovym-dannym> (Дата обращения: 05.05.2019).
14. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. РД 52.27.339-93. М.: Росгидромет, 1996. 181 с.
15. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 702 с.
16. *Afzali-Gorouh Z., Bakhtiari B., Qaderi K.* Probable maximum precipitation estimation in a humid climate // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 18. 2018. P. 3109–3119.
17. *Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken Ch., Anthes R.A., Ware Bevis R.H.* GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № D14. P. 15787–15801.
18. *Fernando W.C.D.K., Wickramasuriya S.S.* Estimating Probable Maximum Precipitation – From Research to Design // ENGINEER. 2007. V. 1. № 04. P. 116–122.
19. *Hershfield D.M.* Estimating the Probable Maximum Precipitation // J. Hydraulics Division. 1961. V. 87(5). P. 99–106.
20. *Klimenko D.Y., Ostakhova A.L., Tuneva A.* Experimental Data on Maximum Rainfall Retention on Crowns of Deciduous Tree Species of the Middle Ural (Russia) // Forests. 2019. V. 10(2). 183.
21. *Liu W.T.* Statistical Relation between Mean Precipitable Water and Surface-Level Humidity over Global Oceans // Monthly Weather Rev. Am. Meteorol. Soc. 1986. V. 114(8). P. 1591–1602.
22. Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP). World Meteorological Organization (WMO). 2009. № 1045. 257 p.
23. *Razali J., Sidek L.M., Rashid M.A., Hussein A., Marufuzzaman M.* Probable Maximum Precipitation Comparison using Hershfield's Statistical Method and Hydro-Meteorological Method for Sungai Perak Hydroelectric Scheme // Int. J. Engineering Technol. 2008. V. 7. P. 603–608.
24. *Svensson C., Rakhecha P.R.* Estimation of probable maximum precipitation for dams in the Honfru River Catchment, China // Theoretical and Applied Climatology. 1998. V. 59. № 1. P. 79–91.
25. *Vivekanandan N.* Estimation of Probable Maximum Precipitation Using Statistical Methods // World J. Res. Rev. (WJRR). 2015. V. 1. Is. 2. P. 13–16.