ОПАСНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ В СЕВАСТОПОЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

В.П. Евстигнеев^{1,2}, В.А. Наумова¹, М.П. Евстигнеев²

¹ Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: vald_e@rambler.ru

В статье исследуется повторяемость опасных метеорологических явлений в Севастопольском регионе с акцентом на явления сильных осадков. Получены кривые обеспеченностей наибольших суточных сумм осадков, а также выполнен анализ профилей сильных дождей. В частности, получены 3 типа распределения интенсивности дождя. Дано описание случая сильного дождя 07 июня 2019 г., в результате которого был превышен исторический максимум суточной суммы осадков на одной из станций региона.

Ключевые слова: опасные явления, осадки, распределение экстремальных величин, профиль дождя, Севастопольский регион, изменение климата

Поступила в редакцию: 01.08.2019. После доработки: 21.08.2019.

Введение. Развитие стихийных гидрометеорологических явлений является одним из самых опасных проявлений нестабильности климата. В опубликованном Всемирным экономическим форумом списке глобальных рисков на 2017 г. в пятерке главных, ранжированных по вероятности, первую позицию заняли экстремальные погодные явления [1]. За последние 20 лет их количество в России возросло. Вместе с ними возросли и погодно-климатические риски в секторах экономики и социальной сфере [1].

Понимая масштабы потерь в обществе, связанных с гидрометеорологическими факторами, мировым сообществом уделяется большое внимание мониторингу и исследованиям неблагоприятных и экстремальных явлений. Информация об опасных явлениях (ОЯ) обобщается и систематизируется с целью возможного уменьшения последствий, разрабатываются уточненные методики прогнозирования опасных явлений и воздействия погоды на отдельные отрасли экономики.

Для этих задач критичным является выбор объективного критерия метеорологического явления, несущего угрозу для жизни или здоровья граждан и/или опасность материального ущерба в пределах того или иного региона. При вы-

боре критериев, как правило, учитывают следующее:

- критическое значение гидрометеорологической величины или интенсивность явления должны быть нехарактерными (редкими) для данной территории или времени года;
- климатическая повторяемость явления должна составлять не более 10%.

Мониторинг возникновения ОЯ осуществляет Росгидромет и в настоящее время служба обеспечивает регулярные наблюдения более чем за тридцатью их видами. Для Крымского региона около трех четвертей всех опасных явлений связано с развитием очень сильных осадков. Выпадение экстремального количества осадков нередко сопровождается паводками на реках Крыма, образованием и сходом селей в Алуштинском и Судакском районах, эрозией почв и прочими последствиями. Существуют свидетельства изменений в режиме осадков на обширных территориях. Так, согласно [1], в России за последние 40 лет темпы роста годовых сумм осадков составили 2,1% за 10 лет. На фоне такой климатической тенденции может увеличиваться частота экстремальных осадков, а, значит, и повторяемости связанных с ними ОЯ. Своеобразным подтверждением этого тезиса является событие сильного

ливневого дождя в начале июня текущего 2019 г. в Севастопольском регионе. В результате дождя на одной из метеорологических станции города была зарегистрирована суточная сумма осадков, обновившая «рекорд» за всю историю наблюдений (с 1936 г.).

В настоящей работе была поставлена задача исследовать повторяемость опасных явлений в особенности сильных

осадков в Севастопольском регионе в современный климатический период.

Используемые данные. На территории г. Севастополя мониторинг ОЯ проводится на двух морских гидрометеорологических станциях (табл. 1), одна из которых расположена на Павловском мысе (МГ Севастополь), другая на мысе Херсонес (МГ Херсонесский маяк).

Таблица 1. Информация о гидрометеорологических станциях Севастопольского региона

Пункт наблюдения	Код	Долгота	Широта	Высота (м)	Доступность данных наблюдений (исходный год)		
					количество осадков	ОЯ	плювиограф
МГ Севастополь	4463350	33.5	44.6	7	с 1936 г.	с 1976 г.	с 1994 г.
МГ Херсонесский маяк	4463340	33.35	44.581	2	с 1936 г.	с 1976 г.	–

Информационную основу исследования составил электронный архив гидрометеорологических данных Севастопольского ЦГМС [2]. В работе использованы данные наблюдений за ОЯ и данные ежечасной регистрации дождя по плювиографу. Однако, если данные наблюдений за ОЯ доступны за период 1976–2018 гг., то по плювиографу – только с 1994 г. по МГ Севастополь (на МГ Херсонесский маяк такие наблюдения не проводятся). Хотя в целом по отдельным метеорологическим параметрам в банке данных содержится информация за более чем 80-летний период.

В практике гидрометеорологических наблюдений критерием очень сильных осадков (ОЯ) для территории г. Севастополя является 30 мм осадков, выпавших за 12 ч и менее.

Метод исследования. В работе представлены результаты анализа повторяемости опасных метеорологических явлений на территории г. Севастополя, их внутригодового распределения и распределения по видам.

В работе выполнено исследование статистических свойств распределения экстремальных атмосферных осадков методом блочных максимумов. Для этого была сформирована выборка наибольших за год суточных сумм осадков по данным станций МГ Севастополь и МГ Херсонесский маяк за период 1936–2018 гг. Эмпирические распреде-

ления наибольших сумм осадков аппроксимировались функцией обобщенного распределения экстремальных величин (GEV)

$$F_{GEV}(x) = \Pr\{X \leq x\} = \exp\left[-\left(1 + \xi \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right], \quad (1)$$

где ξ – параметр формы; σ – масштабирующий параметр; μ – параметр положения экстремума. Для оценки параметров распределения использовался метод максимального правдоподобия [3]. Заданная функция F_{GEV} использовалась для расчета ожидаемого периода повторяемости экстремальных величин по формуле

$$\tau_{GEV}(x) = \frac{1}{1 - F_{GEV}(x)}.$$

На основе вычислений строились теоретические кривые обеспеченностей $F=1-F_{GEV}$.

Для случаев сильных дождей в работе представлен результат сравнительного анализа «профилей дождя», т.е. относительного изменения интенсивности выпадения осадков во время дождя, по данным плювиографа на МГ Севастополь. Всего за период с 1994 по 2018 гг. было зарегистрировано 432 случая дождя с разным количеством выпавших осадков. Для построения «профиля» продолжительность дождя приводилась к единичному интервалу, где 0 соответствует началу дождя, 1 – моменту его

окончания. Интенсивность за отдельные промежутки времени (как правило, 10 мин, согласно методике обработки данных плювиографа) также приводится к относительным единицам, путем деления ее величины на среднюю интенсивность, рассчитанную для всего дождя. Относительная интенсивность может превосходить 1, показывая во сколько раз она превышает среднюю за дождь величину.

Форма представления информации в виде «профилей» позволяет сравнивать и типизировать совокупность случаев дождей по распределению интенсивности независимо от различий в их продолжительности.

В работе были получены профили 115 дождей с суммой осадков 10 мм и более. Была проведена типизация совокупности профилей по распределению интенсивности методом кластерного

анализа к-медоид, который является робастным аналогом более распространенного метода к-средних. Ключевым этапом процедуры является определение оптимального числа кластеров k . В нашей работе использован метод отбора числа кластеров, основанного на статистике расхождений

$$Gap_k = E_n[\log W_k] - \log(W_k),$$

где W_k – среднее евклидово расстояние между точками внутри k -го кластера, а E_n – математическое ожидание этой величины по n унифицированным множествам, генерируемым методом Монте-Карло из исходной совокупности типизируемых данных [4]. Оптимальное k соответствует максимуму Gap_k . Расчет показал, что таким числом является $k=3$.

Все расчеты выполнены в среде статистического программирования R [5].

Рис. 1. Межгодовой ход (а) и внутригодичная (б) изменчивость частоты ОЯ на гидрометеорологических станциях Севастопольского региона за период 1976–2018 гг. (синие столбики – МГ Севастополь, красные столбики – МГ Херсонесский маяк)

Общая повторяемость ОЯ на территории г. Севастополь. За период 1976–2018 гг. на МГ Севастополь было отмечено 46 метеорологических явлений, достигших критерия ОЯ, на МГ Херсонесский маяк – 76. Такая значительная разница в количестве ОЯ на двух близлежащих пунктах наблюдения

сложилась за счет значительно большего количества ОЯ сильного ветра на МГ Херсонесский маяк.

В среднем за год отмечается около двух случаев ОЯ на МГ Херсонесский маяк и немногим более одного – на МГ Севастополь. Однако частота явлений существенно отличается от года к году.

Например, в 1981 и 1989 гг. на МГ Херсонесский маяк отмечалось до 7 явлений (рис. 1а). Следует отметить, что ОЯ отмечались не каждый год и более чем в 30% случаев не наблюдались вовсе на обеих станциях.

Рис. 2. Повторяемость (%) по видам ОЯ по данным гидрометеорологических станций МГ Севастополь (а) и МГ Херсонесский маяк (б) за период 1976–2018 гг.

Все случаи ОЯ на территории г. Севастополя относятся к 8 видам (рис. 2) – дождь, дождь ливневый, снег, сильный ветер, шквал, туман, метель низовая и общая, повторяемость которых существенно отличается: от 1,3% (шквал, метель) до 46,1% (дождь) на МГ Севастополь и от 2,2 (шквал) до 73,9% (дождь) на МГ Херсонесский маяк.

Возникновение некоторых видов опасных метеорологических явлений (например, метели, снег) приурочено к конкретным сезонам (рис. 3), однако их повторяемость невысока. Незначительное число случаев таких ОЯ создает большие затруднения в анализе статистических закономерностей их возникновения и изменчивости их частоты.

Частота ОЯ имеет четко выраженный внутригодовой ход (см. рис. 1б). Меньше

всего случаев ОЯ в г. Севастополь отмечается в холодное полугодие. Наибольшее – в теплое, за счет случаев сильного (ливневого) дождя. В целом очень сильный дождь вносит основной вклад в повторяемость ОЯ, независимо от сезона. Однако на теплый период года приходится около 70% всех случаев этих явлений.

Межгодовой ход частоты ОЯ сильных осадков (см. рис. 1а) является неравномерным и содержит признаки квазипериодичности, однако короткая длина ряда не позволяет надежно выделять соответствующие гармоники. За период 1976–2018 гг. отмечены два 13-ти и 15-летних периода с высокой частотой возникновения ОЯ, разделенные короткими 4-х и 6-летними периодами практически их отсутствия. Новый период высокой повторяемости ОЯ сильных осадков, видимо, начался в 2019 г. и ознаменовался событием сильного ливневого дождя, прошедшего 7 июня в г. Севастополь. По данным МГ Херсонесский маяк в течение дождя выпало 75 мм осадков, на МГ Севастополь – более 30 мм.

Характеристика сильных дождей в Севастопольском регионе. Очень сильных осадков за период 1976–2018 гг. было отмечено по 37 случаев, как на Павловском мысе, так и на мысе Херсонес. Несмотря на относительно небольшую территорию, на которой располагается г. Севастополь, осадки достигают критерия ОЯ чаще на одном из пунктов наблюдения и только в 13 случаях одновременно на двух.

Развитие ОЯ приводит к накоплению в осадкомерах на метеорологических станциях максимальных сумм осадков, которые во многих случаях становятся годовыми максимумами. Анализ наибольших суточных сумм осадков за длительный период наблюдений 1936–2018 гг. позволил построить теоретические кривые обеспеченностей для двух станций региона (рис. 3). При построении использовалась статистическая GEV-модель (1). Из рис. 3 видно, что кривые двух станций близки, что свидетельствует об одинаковой статистической закономерности распределения экстремальных сумм в регионе.

Рис. 3. Кривые обеспеченностей наибольших суточных сумм осадков по данным МГ Севастополь (синяя сплошная линия) и МГ Херсонесский маяк (красная прерывистая линия) за период 1936–2018 гг. Звездочками обозначена обеспеченность суточных сумм осадков за 07 июня 2019 г.

Ключевым параметром модели (1) является параметр формы ξ , который определяет, к какому из трех семейств классических распределений экстремальных величин тяготеет обобщенная GEV-функция:

- $\xi > 0$ – распределение Фреше;
- $\xi = 0$ – распределение Гумбеля;
- $\xi < 0$ – распределение Вейбулла.

Для станций Севастопольского региона величина ξ оказалась незначимо отличной от 0, т.е. распределение наибольших суточных сумм осадков тяготеет к функции Гумбеля. Стоит, правда, отметить, что выборочная ξ является неточной, поскольку для надежной оценки требуется ряд наблюдений длиной более 120 лет [6]. Согласно выводам [6], полученным на основе анализа данных наблюдений 15000+ станций по всему миру, истинное значение параметра формы ξ с вероятностью 99% должно быть заключено в интервале от 0 до 0.23, т.е. выборка экстремумов должна аппроксимироваться функцией Фреше.

Построение кривых обеспеченностей позволяет дать оценку вероятных суточных сумм осадков разных периодов повторяемости. Так расчетные значения суточных сумм повторяемостью 1 раз в

50 лет составляют 61 мм и 62 мм для МГ Севастополь и МГ Херсонесский маяк; повторяемостью 1 раз в 100 лет – 67 мм и 68 мм соответственно.

С практической точки зрения особый интерес представляет распределение интенсивности выпадения осадков в течение сильных дождей. Такая информация важна, например, при проектировании систем отведения дождевой воды в систему канализации. Основой такого анализа служит выборка относительных «профилей» дождя, полученная по записям плувиографа.

В настоящей работе по данным плувиографа на МГ Севастополь за период с 1994 г. были отобраны 115 событий дождя с суммой осадков не менее 10 мм. Для каждого события были получены профили, представляющие собой относительное изменение интенсивности выпадения осадков в течение дождя, продолжительность которого взята за единицу. Выборка 115 профилей была использована для их типизации согласно методике, описанной в разделе «Метод исследования».

Результатом объективной классификации стали три типичных профиля дождя (рис. 4). Первый характеризуется очень высокой (в 5 раз выше средней) интенсивностью выпадения осадков в первую фазу дождей (20–30% его продолжительности), относящихся, как правило, к ливневым. Второй тип связан с повышенной интенсивностью (примерно в 2 раза выше средней за дождь) дождя в течение первой его половины. К третьему типу относятся дожди, интенсивность которых увеличивается во вторую половину события. Повторяемость этих типов, соответственно, 15%, 42,5% и 42,5%.

Описание случая экстремального дождя 07 июня 2019 г. Выпадения экстремального количества осадков нередко являются причиной паводков на реках Крыма, образования и схода селей, эрозии почв, оползней, уничтожения посевов агрокультур и т.д. Ярким примером является один из последних случаев очень сильного дождя, который наблюдался 07 июня 2019 г., когда за короткий промежуток времени по данным МГ Херсонесский маяк выпало 75 мм, а по данным МГ Севастополь – более 30 мм.

Рис. 4. Типичные «профили» дождей по записям плувиографа на МГ Севастополь с 1994 г.: (а) – тип 1, (б) – тип 2, (в) – тип 3. Обозначения на рисунке: 1 – средняя интенсивность в каждый момент времени, 2 – профиль дождя 07 июня 2019 г., 3 – межквантильная область 10–90%, 4 – межквантильная область 25–75%

Дороги г. Севастополя превратились в полноводные реки, движение на дорогах практически во всех направлениях оказалось парализованным, в отдельных районах города были случаи отключения электроэнергии, повалены деревья. В этот же день сильные дожди также отмечались на ЮБК (в Никитском Саду – 32 мм, в Ялте – 24 мм).

Общая сумма выпавших за эти сутки осадков в окрестностях МГ Херсонесский маяк составила 81,3 мм и превысила исторический максимум. На МГ Севастополь эта величина оказалась почти в два раза меньше – 42,4 мм. Обеспеченность зарегистрированных на двух станциях количеств осадков отличается существенно (см. рис. 3). Если сумма на МГ Севастополь соответствует повторяемости 1 раз примерно в 7-8 лет, то сумма, зарегистрированная на МГ Херсонесский маяк, возможна 1 раз в 360 лет. Несмотря на небольшие масштабы региона и выявленное ранее подобие статистического распределения экстремумов, такое различие может объясняться тем, что формирование осадков обусловлено сложным взаимодействием макро- и микромасштабных процессов. Количество осадков и их повторяемость зависят не только от характера синоптических процессов, но и от физико-географических условий. Распределение интенсивности (профиль) дождя 07 июня 2019 г. соответствовало второму типу (см. рис. 4б). Основная часть осадков выпала за первую половину дождя (15–

50% продолжительности) с максимумом интенсивности, пришедшимся на интервал времени 35–40% общей продолжительности. Ближе к концу события отмечен вторичный, но незначительный по величине, максимум интенсивности осадков.

Приведем описание синоптической ситуации сильного дождя 07 июня 2019 г. В начале июня сухая жаркая погода с максимальными температурами воздуха 28–33°C отмечалась повсеместно на Крымском полуострове. Погодные условия в этот период были сформированы субтропической воздушной массой, которая поступала с юга, юго-запада на Азово-Черноморский бассейн по восточной периферии высотного циклона с центром над Балканами. К 05 июня воздушная масса стала влажно-неустойчивой, при сложившихся синоптических и термодинамических условиях создались благоприятные условия для развития мощных кучево-дождевых облаков. И, как результат, во второй половине дня на территории Крыма прошли сильные дожди, которые сопровождались грозой и выпадением крупного града диаметром 20–40 мм. Следствием этого события стал значительный ущерб, причиненный населению и отраслям экономики на территории Симферопольского, Раздольненского, Сакского районов. Под ударом стихии оказались 3,5 тыс. га сельхозугодий, град принес существенные убытки компании «Крым-теплица», в которой на 21-ом га было

уничтожено практически все остекление в теплицах.

Высотный циклон, сохраняя свое положение, продолжил вынос теплых воздушных масс на Крымский полуостров, поддерживая неустойчивые погодные условия у поверхности земли. К 07 июня в средней тропосфере циклон начал заполняться, при этом перенос воздушных масс в юго-западном направлении сохранился. Ночью 07 июня на одной из волн субтропического фронта над Черным морем образовался циклон, который и стал причиной экстремальных осадков в г. Севастополь.

Заключение. Для территории Севастопольского региона большее число случаев ОЯ отмечается в теплое полугодие. Причем основной вклад в повторяемость ОЯ (около 70% всех случаев) вносят явления сильного дождя. Так в июне сего года произошел дождь, при котором выпавшая за сутки сумма осадков (81,3 мм), по крайней мере, по данным МГ Херсонесский маяк, превысила исторический максимум, и, судя по расчету обеспеченности, такой дождь является чрезвычайно редким событием. Произошедшее может расцениваться как подтверждение тезиса об увеличении частоты и интенсивности опасных метеорологических явлений на фоне современных климатических тенденций. Однако с уверенностью об этом можно говорить только при наличии более длинных рядов наблюдений за ОЯ, а также при анализе больших по пространству регионов. Как было показано в работе, многолетний ход частоты опасных метеорологических явлений в реги-

оне хоть и обладает признаками квазипериодичности, делать вывод о наличии четких однонаправленных тенденций пока преждевременно.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект №18-05-01073) и частично в рамках гранта РФФИ и г. Севастополь № 18-45-920068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб., 2017. 106 с.
2. Евстигнеев В.П., Наумова В.А., Евстигнеев М.П. Адаптация системы обработки и передачи данных гидрометеорологических наблюдений в Крымской республике в структуру Росгидромета // Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2015. Вып. 180. С. 110–120.
3. Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag, 2001. 211 p.
4. Tibshirani R., Walther G., Hastie T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic // J. R. Statist. Soc. B. 2001. V. 63. P. 411–423.
5. Core Team R. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012. ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.r-project.org/> (дата обращения: 13.08.2019).
6. Papalexiou S.M., Koutsoyiannis D. Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall // Water Resources Research. 2013. V. 49. P. 187–201.

DANGEROUS METEOROLOGICAL EVENTS OF RAINFALLS IN SEVASTOPOL REGION

V.P. Evstigneev^{1,2}, V.A. Naumova¹, M.P. Evstigneev²

¹ Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

² Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

In the present study the frequency of dangerous meteorological events in Sevastopol region was studied with special focus on heavy precipitation events. Frequency distribution functions of annual maximum rainfall amounts for two stations were calculated along with rainfall profile analysis. As a result, 3 types of rainfall intensity distribution were obtained. Description of extreme rainfall on June 7th, 2019 resulting in registration of the record-breaking daily precipitation amount at one of two stations of the region is given.

Keywords: dangerous meteorological events, precipitation, extreme value distribution, rainfall profile, Sevastopol region, climate change.