

УДК 556.12;551.579.4

## СТОХАСТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВНЕЗАПНЫХ ЛИВНЕВЫХ ПАВОДКОВ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА И КРЫМА

© 2023 г. Л. В. Куксина<sup>а, \*</sup>, П. А. Белякова<sup>б, \*\*</sup>, В. Н. Голосов<sup>а, \*\*\*</sup>,  
Е. Ю. Жданова<sup>а, \*\*\*\*</sup>, М. М. Иванов<sup>а, с, \*\*\*\*\*</sup>, А. Л. Гуринов<sup>с, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

<sup>б</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>с</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*E-mail: ludmilakuksina@gmail.com

\*\*E-mail: pobel@mail.ru

\*\*\*E-mail: gollossov@gmail.com

\*\*\*\*E-mail: ekaterinzhdanova214@gmail.com

\*\*\*\*\*E-mail: ivanovm@bk.ru

\*\*\*\*\*E-mail: gurinov.artem@gmail.com

Поступила в редакцию 24.02.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 02.06.2023 г.

Внезапные ливневые паводки (ВЛП) являются одними из наиболее опасных гидрометеорологических явлений в мире. В представленной работе рассматриваются основные стохастические параметры формирования ВЛП на примере событий, произошедших в 1990–2021 гг. в малых речных бассейнах Черноморского побережья Кавказа и Крыма. Установлено, что основным фактором формирования ВЛП является выпадение осадков редкой повторяемости, однако в ряде случаев возникновение ВЛП может быть связано с комбинацией нескольких параметров, не достигших критических значений. ВЛП в исследуемом регионе формируются в летне-осенний период с максимумом зафиксированных случаев в августе и характеризуются очень высокими скоростями роста уровней воды (1.2–1.3 м/ч), а сток наносов за одно событие может быть сопоставим со среднегодовыми значениями. Статистический анализ продолжительных рядов наблюдений за осадками в регионе позволил сделать предположение о более частом возникновении ВЛП по сравнению с числом зафиксированных и описанных случаев.

*Ключевые слова:* внезапный ливневый паводок (ВЛП), ливневые осадки, интенсивность, малый речной бассейн, Черноморское побережье, Кавказ, Крым

DOI: 10.31857/S0869607123020064, EDN: ADZFLS

### ВВЕДЕНИЕ

Внезапные ливневые паводки (ВЛП) являются одними из наиболее опасных стихийных гидрометеорологических явлений в мире [42, 54]. Выполненные исследования показывают, что ВЛП характеризуются наивысшей средней смертностью среди паводков других типов [46, 54]. Тем не менее, в российской гидрологии специальный термин впервые был применен после наводнения в Крымске в 2012 г. [1, 8, 21, 23, 60], и до сих пор отсутствует четкая система критериев, позволяющая отделить ВЛП от се-

лей и других опасных явлений подобного типа [23]. Этот факт, наряду с практически полным отсутствием публикаций, освещающих ВЛП в Восточной Европе, на английском языке, приводит к тому, что многие события такого типа до сих пор не находят отражения в общемировых базах данных [56, 67], хотя ежегодно сообщается о наводнениях на Черноморском побережье Кавказа (ЧПК) [3, 23, 39].

ВЛП обычно определяется как быстроразвивающийся паводок (в течение 3–6 ч) после спровоцировавшего его ливня (или другой причины) и, как правило, происходит в горных районах [23, 54, 69]. ВЛП представляет собой комплексное явление, возникает, развивается и последствия которого обусловлены взаимодействием гидрометеорологических, литолого-геоморфологических и антропогенных факторов [23].

Наиболее часто ВЛП возникают в северном полушарии в зонах субтропического, тропического и экваториального климатов [23], однако в последние десятилетия их частота и интенсивность возрастает в районах, для которых ранее подобные явления не были характерны [40]. При этом систематические наблюдения за формированием ВЛП по существу не проводятся ввиду труднодоступности горных речных бассейнов, сложности проведения натурных гидрологических измерений в период прохождения ВЛП и частой приуроченности зон их зарождения к малым водосборам (площадью менее 100 км<sup>2</sup> [47]), а также высокой пространственно-временной изменчивости ливней, особенно в горных и предгорных районах. Известные на данный момент обобщения, касающиеся оценки условий возникновения и повторяемости ВЛП, обычно приурочены к отдельным регионам Европы и США [45, 47, 59].

Наиболее изменчивыми факторами формирования и развития ВЛП являются метеорологические параметры, в первую очередь, такие как количество и интенсивность ливневых осадков и их продолжительность [42]. Изменение климатических условий, постепенный рост температуры воздуха, способствующий возрастанию интенсивности таяния льда и снега в горах, а также увеличение слоя, повторяемости осадков высокой интенсивности происходит с середины 1970-х годов [14, 50, 51, 63], что в свою очередь оказывает влияние на проявление внезапных ливневых паводков, селей, оползней, прорывов горных озер [23, 61, 62].

В частности, трансформация атмосферной циркуляции, приводит к увеличению выходов черноморских циклонов на побережье Кавказа, что способствует увеличению повторяемости экстремальных осадков [20]. Согласно последним докладом, посвященным особенностям климата и климатических рисков на территории Российской Федерации, в последние десятилетия отмечается рост неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений, а экстремальные погодные явления являются наиболее вероятными среди глобальных рисков, с которыми сталкивается человечество [52].

Районирование мировых событий [23, 56] позволяет предположить, что на северном побережье Черного моря и на некотором удалении от него наиболее подверженными возникновению ВЛП являются речные водосборы, расположенные в горах и предгорьях Крыма и Западного Кавказа. Помимо климатических характеристик, формированию ВЛП в регионе способствуют также особенности строения речных водосборов — вытянутая по длине конфигурация большей части бассейнов, способствующая быстрому добеганию склонового стока до основного русла, и значительные уклоны благоприятствуют крайне быстрому формированию стока. Исследования климатических изменений на территории ЧПК [66] и Крымского полуострова [22, 28, 71, 72] указывают на рост температуры воздуха, а для ряда районов отмечается рост индексов экстремальности осадков. Это, несомненно, должно найти свое отражение в характере проявления ВЛП на исследуемой территории. Нередко ВЛП становятся причиной человеческих жертв на севере Черноморского побережья [3, 11, 15, 16], где последние мощные паводки в результате выпадения ливней наблюдались в июне 2022 г. Важным фактором роста социально-экономического ущерба вследствие прохождения ВЛП на север-

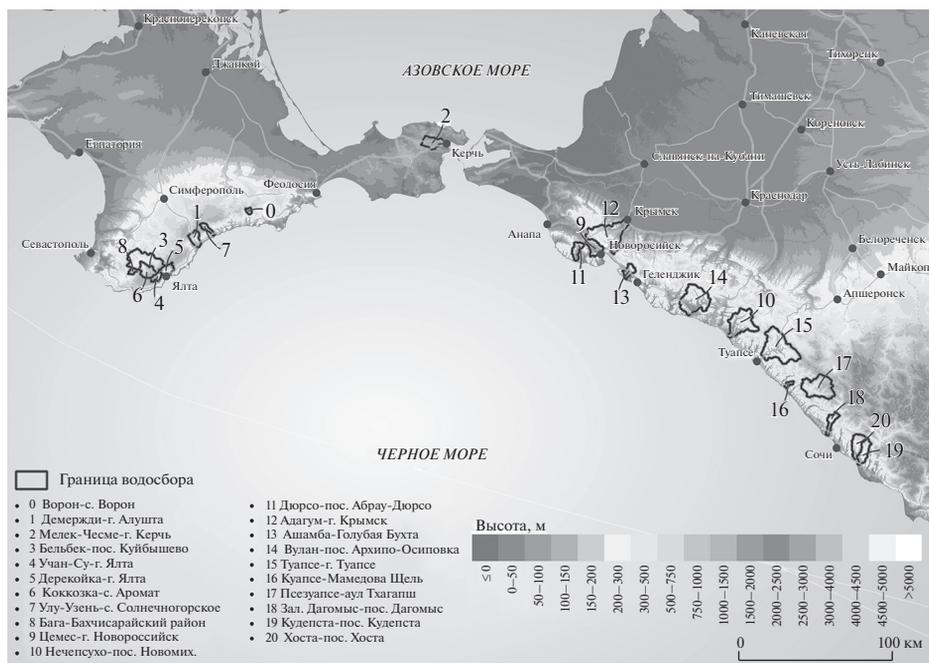


Рис. 1. Изучаемые бассейны рек Западного Кавказа и Крыма.

Fig. 1. The studied area of the Western Caucasus and Crimea.

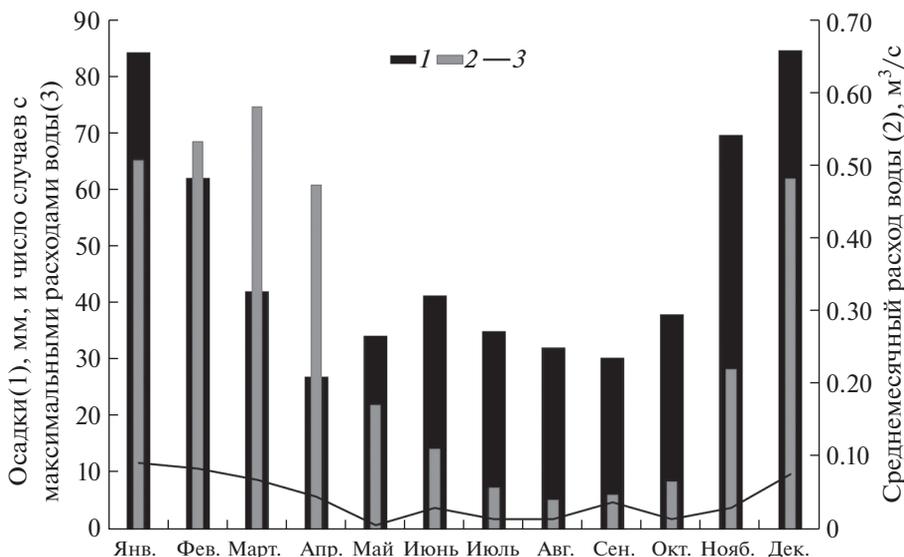
ном побережье Черного моря является неконтролируемая хозяйственная деятельность, что в частности, проявляется в несанкционированном застраивании речных пойм, отсутствии дренажных систем у жилых домов, зарастании и засорении русел [2, 7, 15, 20, 37].

В связи с этим основной задачей данного исследования является анализ стохастических факторов формирования ВЛП, зафиксированных в речных бассейнах Черноморского побережья Западного Кавказа и Крыма, а также изучение их наиболее неблагоприятных сочетаний.

## РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемая территория включает в себя бассейны рек, впадающих в Черное море от р. Кудепста (19 на рис. 1) на востоке до р. Дюрсо (11 на рис. 1) на западе ЧПК (исключение – р. Адагум (12 на рис. 1), относящаяся к бассейну р. Кубань) и реки Керченского полуострова и Южного берега Крыма (ЮБК) (см. рис. 1). Бассейны рек расположены в зонах умеренного и субтропического климатов и могут быть разделены на районы влажных (Туапсе–Сочи) и сухих (р. Ашамба (13 на рис. 1), Алушта–Ялта) субтропиков, что сказывается на условиях формирования ВЛП, в том числе через предшествующее увлажнение почвенного покрова.

Среднегодовое количество осадков на ЮБК меняется от 600 мм (Ялта) до 1000 более мм (Ай-Петри) и составляет порядка 450 мм (Керчь) на территории Керченского полуострова. Максимальное суточное количество осадков, способствующее формированию ВЛП, выпадает в наиболее высокогорных областях Крыма и может превы-



**Рис. 2.** Внутригодовое распределение среднего количества осадков, расходов воды и суммарного числа случаев максимальных внутригодовых расходов воды в р. Учан-Су – Ялта в 1946–2016 г. 1 – количество осадков, мм, 2 – расход воды, м<sup>3</sup>/с, 3 – число случаев максимальных расходов воды в течение года.

**Fig. 2.** Mean month distribution of precipitation, water discharge and total number of cases with annual maximum water discharge in the Uchan-Su Riv. – Yalta in 1946 – 2016. 1 – precipitation, mm, 2 – water discharge, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 3 – number of cases with maximum water discharge within the year.

шать 200 мм/сут, эта величина снижается до 100–120 мм/сут в предгорьях [22] и достигает 100–160 мм/сут на Керченском полуострове.

Среднегодовое количество осадков на ЧПК увеличивается от 537 мм (Анапа) до 1626 мм (Сочи) в направлении с северо-запада на юго-восток и изменяется с ростом высоты (местоположение метеостанций см. на рис. 1).

Согласно данным стационарных наблюдений на гидрологических постах, внутригодовое распределение стока вполне соответствует распределению количества осадков – повышенные расходы воды наблюдаются в холодный период года (декабрь–апрель), теплый период (с мая по ноябрь) характеризуется низкой меженью (вплоть до полного пересыхания водотоков), прерываемой кратковременными паводками, связанными с выпадением ливневых осадков (рис. 2). Аналогичная тенденция характеризует распределение наблюдаемых максимальных расходов воды в течение года (см. рис. 2).

Однако, несмотря на характерное среднемноголетнее распределение расходов воды в течение года согласно данным стационарных наблюдений, максимальные расходы воды и наиболее разрушительные ВЛП происходят в летне-осенний период, что соответствует увеличению экстремальности дождевых осадков в указанный период [3, 20]. Осадки холодного времени года характеризуются меньшей интенсивностью и большей продолжительностью, что существенно снижает вероятность возникновения крупных ВЛП. Следует учитывать, что часть ВЛП не фиксируется ввиду сложности проведения натурных наблюдений непосредственно в период их прохождения. Водные смерчи, иногда выступающие специфическим фактором формирования ВЛП в бассейнах малых рек на ЧПК и в Крыму, также формируются в летне-осенний период

[6]. Максимальные расходы воды ВЛП могут превышать среднегодовые расходы воды в 200–400 раз [26]. Как правило, максимальные расходы наносов также формируются в это время.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выявление ключевых факторов возникновения ВЛП производилось на основе анализа сведений о ВЛП, прошедших в различных регионах мира.

Статистический анализ данных о ВЛП в мире за 1985–2018 гг. показывает, что основной причиной их формирования (в 95% случаев) являются интенсивные осадки наибольшей продолжительности [56]. Данный вывод соответствует результатам, полученным для речных бассейнов на территории Европы [59]. Согласно [47], площадь бассейна не превышает 1000 км<sup>2</sup>, а продолжительность осадков, предшествующих ВЛП, не более 34 ч, однако в ряде случаев допускаются исключения [59].

Климат и рельеф являются основными условиями, определяющими возможность формирования ВЛП. Согласно анализу данных из источника [67], дополнительным критерием определения ВЛП может являться значительный социально-экономический ущерб. Таким образом, оказалось возможным очертить примерный диапазон характеристик события, позволяющий отнести его к ВЛП: 1) малая площадь водосбора, способствующая быстрой концентрации стока в русле; 2) выпадение интенсивных осадков малой продолжительности; 3) расположение речного бассейна в горных или предгорных районах в зонах субтропического или умеренного климатов. Речные бассейны Черноморского побережья РФ соответствуют данным критериям наилучшим образом. Алгоритм отбора данных по этим признакам для анализа характеристик ВЛП на исследуемой территории состоял из следующих шагов с привлечением ряда источников информации:

1. Предварительный отбор речных бассейнов зачастую основан на анализе информации из СМИ, дающей первое представление о возникновении ВЛП, его масштабах, социально-экономическом эффекте и размерах ущерба. Для более глубокого анализа далее рассматривались другие публикации, включая научные. Кроме того, данные СМИ привлекались при анализе длительных рядов осадков, когда экстремальные дожди провоцировали возникновение разрушительных ВЛП, однако данные события лишь упоминались в местных новостных источниках без анализа основных характеристик ВЛП.

2. После первичного анализа информации из СМИ, подбирались научные публикации по теме исследования, в частности, касающиеся описания конкретных событий и обобщения собранных ранее сведений о прошедших в регионе событиях (наводнениях, селях). Как правило, информация, которая относится к наводнениям на территории Краснодарского края, приводится в виде списка зафиксированных событий с краткой обобщенной характеристикой отдельных факторов (например, количества выпавших осадков на разных постах, подъема уровня и генезиса события [10], сведениях о максимальных расходах различной обеспеченности [2]. Для Крымского полуострова имеются довольно ограниченные сведения в формате обобщающих работ, включающих сведения о селях и паводках [18, 19, 26]. Опубликованные данные по отдельным зафиксированным событиям, выполненные по результатам описания прошедших крупных паводков [3, 12, 27, 31, 41, 55].

3. Анализ доступных данных стационарных наблюдений. Анализ суточных данных об осадках, гидрографов стока на постах позволил выявить некоторые случаи интенсивного роста уровней воды в регионе.

4. Самостоятельно собранные данные в результате проведения полевых работ на реках, где фиксировались ВЛП. Подобные работы были проведены в бассейнах рр. Ашамба, Хоста, Мелек-Чесме, Ворон, Демерджи с целью описания характерных и специфических

черт бассейнов, где возникают ВЛП, а также выявления последствий паводков на местности.

Поскольку основным стохастическим фактором формирования ВЛП являются осадки высокой интенсивности, но относительно небольшой продолжительности, а также предшествующая увлажненность в бассейне, выполнялась оценка данных параметров для отдельных известных случаев ВЛП. Для каждого из этих ВЛП оценивалась повторяемость осадков, спровоцировавших паводок, а за предшествующий период (5–10–20–30 сут.) оценивалось предшествующее увлажнение в бассейне. На основе данных о суточных суммах осадков на метеорологических станциях, выявлялись тенденции (или их отсутствие) в изменчивости количества осадков, их максимума, в индексах экстремальности осадков, представленные в работе [50]. Оценка проводилась для метеорологических станций Керчь, Сочи, Туапсе, Анапа, данные по которым доступны на ресурсе [30]. В связи с высокой пространственно-временной изменчивостью характеристик осадков, особенно в горных и предгорных районах, дополнительно привлекались оценки суточных сумм осадков по спутниковым измерениям IMERG с разрешением около 10 км [49] для теплого периода май–октябрь, 2001–2020 гг. Экстремальное количество осадков оценивалось 0.99 квантилем. По спутниковым данным рассчитывались осадки, выпавшие внутри границ водосбора. Если в водосбор попадала больше, чем одна точка, то рассчитывались для каждого дня среднее значение.

Верификация данных дистанционного зондирования IMERG по осадкам для Крымского полуострова представлена в работе [4]. Отмечается повышение ошибки восстановления количества осадков в прибрежных районах, а также сглаживание суточных пиков осадков, вместе с тем отмечается, что качество данных IMERG превосходит качество данных одного из альтернативных источников E-OBS и применимо для анализа осадков в горных районах.

При характеристике прошедших ВЛП на Черноморском побережье важной задачей являлась оценка максимальных расходов на различных замыкающих створах. Максимальные расходы воды экстремальных быстроразвивающихся паводков оценивают косвенными методами по меткам уровней высоких вод [25]. Прямые измерения даже в створах гидрологических постов обычно невозможны, поскольку оборудование гидрологических постов оказывается затоплено или повреждено из-за воздействия потока (пост был частично разрушен в г. Крымск в 2012 г., в г. Туапсе при каждом сильном наводнении сносит оборудование поста (1991, 2010, 2018)) и измерения контактным способом становятся опасными для наблюдателя. Бесконтактные методы измерения уровней начали применяться на водотоках исследуемой территории, однако такие данные часто содержат ошибки и требуют тщательной проверки их надежности. Определение максимальных расходов выполняют по методике [53]. После паводка проводится гидрографическая съемка по определению отметок поперечного сечения, меток наивысших уровней воды, локальных уклонов водной поверхности и оценка характеристик шероховатости потока [58, 64]. Оценки максимальных расходов выполняются по этому методу, как в створах гидрологических постов, так и в неизученных местах. После исторических наводнений дополнительно проводятся подробные полевые гидрографические обследования вдоль течения основных притоков и в верховьях рек. Оценки максимальных расходов воды для разных створов внутри бассейна опубликованы для наводнений на р. Туапсе в 1991, 2010 гг. [27] и на р. Адагум в 2012 г. [12].

Обработка данных, собранных таким образом для событий на территории речных бассейнов исследованной части Черноморского побережья (рис. 1), осуществлялась в следующей последовательности:

1. Подготовлена таблица стохастических характеристик для ВЛП, прошедших в речных бассейнах в 1990–2021 гг. Заполнение всех обозначенных в таблице характеристик для событий осуществлялось: 1) с использованием опубликованной информа-

ции, 2) на основе анализа данных об осадках, сформировавших, а также предшествующих ВЛП, 3) с расчетом максимальных расходов воды в замыкающих створах;

2. Анализ характеристик (в том числе: определение обеспеченности, продолжительности и максимальной интенсивности осадков, спровоцировавших ВЛП; анализ сезонной повторяемости ВЛП; оценка предшествующих ВЛП осадков; анализ интенсивности подъема уровня воды; продолжительности ВЛП; оценка максимальных расходов воды для разных замыкающих створов).

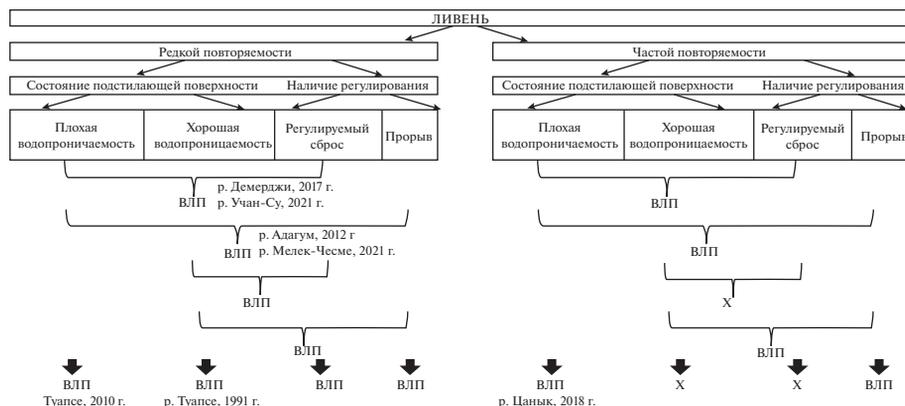
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности формирования ВЛП рассмотрены на примере данных, собранных для 22 ВЛП, зафиксированных на севере Черноморского побережья в период 1990–2021 гг., включая сведения о динамических параметрах, описанных с разной степенью подробности. Стохастические факторы и их комбинации (рис. 3) играют ключевую роль в формировании ВЛП на фоне относительно стабильных консервативных параметров, характеризующих речные бассейны. Наиболее частой причиной формирования ВЛП являются дожди редкой повторяемости [56]. В этом случае другие факторы способны оказывать воздействие на мощность ВЛП, причиной возникновения явления они не являются. Иная картина наблюдается при выпадении дождей относительно частой повторяемости, когда формирование ВЛП зависит от предшествующего состояния подстилающей поверхности и особенностей регулирования водотока, когда в зависимости от характеристик почвы играет роль ее предшествующая увлажненность [31], а особенности регулирования (антропогенного или естественного происхождения) оказывают ключевую роль в характере роста уровня воды. Стоит отметить, что относительно небольшие осадки могут потребовать сброса воды из регулирующего водоема во избежание перелива и размыва плотины (например, в Ялте в 2021 г., в Алуште в 2017 г.), а также спровоцировать прорыв (разрушение) временной плотины, переполнение и последующую разгрузку карстовых полостей, являющихся типичным явлением на исследуемой территории, а также размыв временных плотин, образованных в результате засорения русла [9, 17, 48]. К сожалению, объем собранной информации не позволяет выполнить распределение всех зафиксированных событий по различным группам, однако для некоторых из выделенных на схеме случаев формирования ВЛП приведены конкретные примеры (см. табл. 1). На схеме, приведенной ниже (см. рис. 3), все события обозначены как ВЛП, поскольку мы считаем, что на начальном этапе формирования ВЛП и сель трудно разделить. При этом необходимо помнить, что разделение этих очень похожих событий является крайне актуальной задачей, поскольку они могут трансформироваться одно в другое [3], и до сих пор бывает сложно определить из описаний, какое именно событие имело место. Нередко ВЛП рассматриваются в рамках изучения селевых паводков [32], селей [34] или же рассматриваются как наводнения смешанного типа при типизации наводнений [37].

## ОБСУЖДЕНИЯ

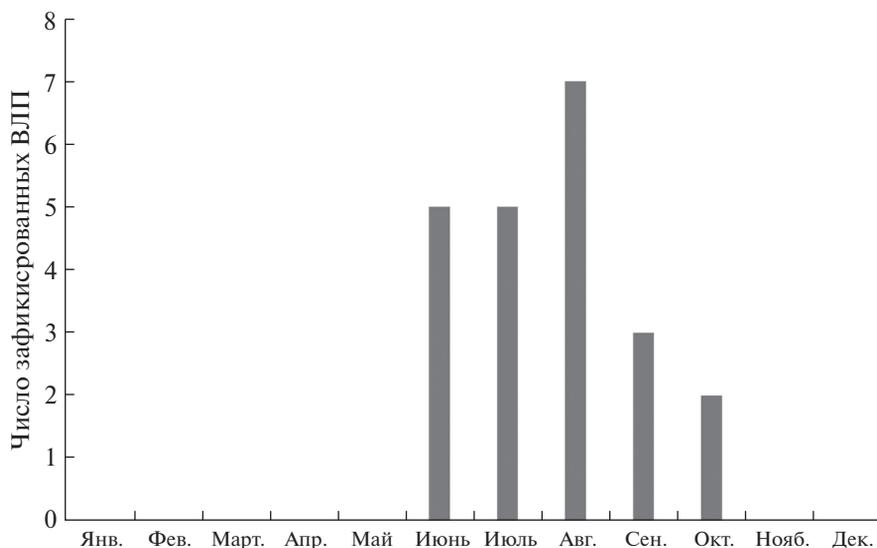
Анализ сезонного распределения ВЛП в 1990–2021 гг. показывает, что события происходят в летне-осенний период с максимум случаев в августе (рис. 4). Данное распределение в общем соответствует общей тенденции для рек Северного полушария [23] и повторяемости наиболее катастрофических наводнений на Северном Кавказе [37]. Распределение случаев возникновения ВЛП не соответствует внутригодовому распределению осадков, однако отражает особенности формирования экстремальных дождей в теплый период года в изучаемом регионе [37].

Количество осадков, выпадавших за период ВЛП для исследуемого региона колеблется в пределах 65.6 (Хоста, 17 августа 2019 г.)–429 (Геленджик 6–7 июля 2012 г.) мм, и практически во всех случаях соответствует очень низкой обеспеченности (менее



**Рис. 3.** Наиболее распространенные причины формирования ВЛП на реках севера Черноморского побережья.

**Fig. 3.** The most frequent triggers of flash floods in the north of the Black Sea Coast.



**Рис. 4.** Сезонное распределение ВЛП в речных бассейнах северного побережья Черного моря в 1990–2021 гг.

**Fig. 4.** Seasonal distribution of flash floods in river basin in the north of the Black Sea Coast in 1990–2021.

1%), за исключением ВЛП на р. Цаньк в сентября 2018 г., когда вследствие предшествующего увлажнения почвы резкий подъем уровня был спровоцирован осадками относительно частой повторяемости [31]. Возможность подобных ситуаций отмечают и другие исследователи [38, 68]. Однако стоит отметить, что все измерения осадков, приведенные в таблице, приводятся для стационарных метеорологических постов, зачастую расположенных в нижних частях речных бассейнов, и, учитывая пространственную неоднородность выпадения осадков [65], особенно в горных и предгорных

**Таблица 1.** Наиболее крупные ВЛП на севере Черноморского побережья и их основные параметры в 1990–2021 гг.  
**Table 1.** The most significant flash floods in the north of the Black Sea Coast and their main factors in 1990–2021

Дата	Регион	Осадки, мм	Река	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	$Q_{\text{пик}}^*$ , м <sup>3</sup> /с км <sup>2</sup> (м <sup>3</sup> /с км <sup>2</sup> )	Время подъема уровня, ч	Средняя интенсивность роста уровня воды, м/ч	Другие бассейны с ВЛП	Ущерб, млрд. руб.	Число жертв
1 августа 1991	Кавказ	68.6–151.2	Туапсе	351	2300* (6.6*)	5	1.3	Пишиш, Макопсе, Аше, Песезапсе, Шахе, Лооидр.	0.24	27
2 сентября 1991	Крым	167	Ворон	10.3	6 (0.6)	–	–	–	–	–
11 августа 1997	Крым	93.1	Демерджи	53.0	146** (2.8**)	–	–	–	–	–
22 августа 1997	Кавказ	15.1	Сочи	296	990* (3.4*)	–	–	–	–	–
9 июня 1998	Крым	80.2	Зап. Дагомыс	49.0	511* (10.4*)	–	–	–	–	–
7–9 августа 2002	Кавказ	–	Ворон	10.3	–	20 min	–	Цемес, Дюрсо	1.5	59
–	Кавказ	–	Широкая балка	32	1120** (35**)	–	–	–	–	–
15–16 октября 2010	Кавказ	53–101	Туапсе	351	1630* (4.6*)	–	0.32	Вулан, Джубга, Песобе, Нечепсухо, Макопсе	2.5	17
6 июля 2012	Кавказ	156–311	Ашамба	44.3	200** (4.6**)	–	–	Цемес, Мезыбь	20	16 (1 проп. без вести)
6–7 июля 2012	Кавказ	156–311	Адагул в г. Крымск	328	1350–1500 (4.1–4.6)	4–5	–	–	–	155 (2 проп. без вести)
22 августа 2012	Кавказ	??	Нечепсухо	–	–	–	–	Шапсухо	1	4
25 июня 2015	Кавказ	95.5	Зап. Дагомыс	49.0	366 (7.5)	3	1.2	Сочи, Херота	0.76	1
–	Кавказ	108.6	Хоста	98.5	386 (3.9)	3	1.3	–	–	–
19 августа 2017	Крым	–	Демерджи	53.0	–	–	–	–	–	–
24–25 октября 2018	Кавказ	208.9	Зап. Дагомыс	49.0	325 (6.6)	0.3–2	–	Сочи, Кудлепта, Мзым-та	3.5	–
–	Кавказ	77	Хоста	98.5	400 (4.1)	3.5	1.2	–	–	–
–	Кавказ	253–362	Туапсе	351	1400 (4.0)	6	–	Макопсе	–	3 (1 проп. без вести)
25–27 октября 2018	Кавказ	218–362	Пишиш	710	1860 (2.6)	>10	–	–	–	4
17–18 июня 2021	Крым	133.1	Учан-Су	16.8	43 (2.6)	–	–	Мелек–Чесме, Бельбек, Дерекойка	–	2 (1 проп. без вести)
4 июля 2021	Крым	84.8–113.5	Коккозка	83.6	219 (2.6)	–	–	Бельбек	–	1
5–6 июля 2021	Кавказ	91.4–246.6	–	–	–	–	–	Песекулс, Афилис, Вулан, Джубга, Шапсухо, Туапсе	Сочи 0.01	2
–	Кавказ	142–319 (559)	–	–	–	–	–	–	–	5
22–23 июля 2021	Кавказ	36–145	–	–	–	–	–	–	–	4

\* максимальный расход и соответствующий ему модуль стока, вероятно, завышены \*\* вероятен недоучет осадков на водосборе, а также завышенные оценки расходов воды по меткам высоких вод.

районах, по всей видимости, не дают объективного представления об их изменчивости в бассейне, а также в верхних звеньях флювиальной сети, являющейся зоной зарождения ВЛП. Наиболее частой причиной формирования экстремальных осадков и, соответственно, ВЛП являются блокирующие антициклоны над ЕТР, способствующие интенсификации циклонической деятельности на периферии, что связано с изменениями циркуляции атмосферы в Северном полушарии [20]. К примеру, по этой причине в регионе выпали рекордные осадки 13–16 августа 2021 г. [70]. 17–18 июня, в результате малоподвижного циклона на востоке Черного моря, в ряде районов Крымского полуострова были превышены (Ай-Петри, выпало 4 месячных нормы, исторический максимум превышен более чем в два раза и составил 295 мм) или приблизились к историческим максимумам (Ялта 133 мм при максимуме 135 мм) выпавшие осадки. В Керчи обильные осадки выпадали дважды, причем за сутки 12–13 августа выпало больше осадков (87 мм), чем в разрушительный паводок 17–18 июня (82 мм), однако ущерб был значительно меньше (расчистка русла).

С учетом сведений об осадках, спровоцировавших возникновение ВЛП в речных бассейнах на севере Черноморского побережья, на основе статистического анализа продолжительных рядов наблюдений на стационарных, метеорологических постах Западного Кавказа и Крыма была выполнена оценка повторяемости осадков, способных спровоцировать крупные события на реках исследуемого региона, в период после 1990 г. (табл. 2). Анализ показал, что осадки редкой повторяемости на исследуемой территории фиксируются значительно чаще, чем ВЛП. Всего за период 1991–2020 гг. на метеостанции Туапсе, к примеру, было зафиксировано 44 случая выпадения осадков редкой повторяемости (см. табл. 2), в то время как в бассейне р. Туапсе за этот же период описано всего 3 ВЛП; в Керчи – 33 случая выпадения осадков редкой повторяемости и ни одного ВЛП на р. Мелек-Чесме за этот же период. Это отчасти указывает на степень изученности данных событий. К примеру, на метеостанции в Керчи 16 сентября 2002 г. были зафиксированы осадки еще более редкой повторяемости, чем 17–18 июня 2021 г., однако спровоцированный ими паводок не упоминается в базах данных и научной литературе. Еще один пример – паводок, прошедший в г. Керчь 25 июня 2015 г., – упоминание о нем содержится только в местных новостных источниках. Аналогичная ситуация относится к бассейну р. Туапсе, где 8 июля 2014 г. были зафиксированы осадки 118 мм (повторяемость 0.1%), однако данное событие также нашло отображение только в местных новостных источниках и социальных сетях. Кроме того, значительно большее число случаев выпадения экстремальных дождей по сравнению с зафиксированными ВЛП свидетельствует о большой пространственной неоднородности осадков, когда зафиксированный на метеостанции (как правило, расположенной в нижних частях речных бассейнов) ливень не всегда предполагает выпадение аналогичного количества осадков схожей интенсивности в других частях речного бассейна. Эти особенности указывают на необходимость применения в регионе учащенной сети гидрометеорологических наблюдений, что позволило бы оценивать слой и интенсивность выпадения осадков и их пространственную неоднородность в пределах бассейнов малых рек и достоверно фиксировать связанные с ними резкие подъемы уровней воды.

На основе применения спутниковых данных IMERG, на текущий момент демонстрирующих наилучшее качество среди аналогичных продуктов [4], была выполнена оценка осадков редкой повторяемости (квантиль 0.99) для исследуемых речных бассейнов (табл. 3). Сравнение с данными наземной сети (Сочи и Анапа) показывает, что коэффициент корреляции суточных сумм осадков не превышает 0.5, поэтому нельзя считать спутниковые данные достаточно надежными для оценки характеристик осадков без проведения дополнительной корректировки данных, что согласуется с выводами работы [4].

**Таблица 2.** Повторяемость экстремальных осадков на севере Черноморского побережья  
**Table 2.** Frequency of extreme precipitation in the north of the Black Sea Coast

Метеостанция	Период наблюдений	Число случаев выпадения осадков вероятности менее 1%		
		Всего	1961–1990	1991–2020
Туапсе	1936–2020	100	34	44
Сочи	1874–2020	195	32	36
Красная Поляна	1936–2020	146	56	48
Керчь	1936–2020	83	26	33
Ялта	1961–1990	25	25	–
Ай-Петри	1961–2019	85	45	40
Симферополь	1886–2020	145	43	34

**Таблица 3.** Оценка экстремальных осадков по спутниковым данным IMERG  
**Table 3.** Estimation of extreme precipitation by IMERG satellite data

Водосбор	Квантиль 0.99, мм	Изменение индекса
р. Ашамба–Голубая бухта	36.9	–
р. Адагум–г. Крымск	33.2	–
р. Дюрсо–п. Абрау-Дюрсо	33.8	–
р. Вулан–п. Архипово-Осиповка	36.8	–
р. Туапсе–г. Туапсе	48.1	–
р. Куапсе–Мамедова Щель	53.9	–
р. Псезуапсе–аул Тхагапш	47	–
р. Западный Дагомыс–п. Дагомыс	49.1	–
р. Хоста–п. Хоста	51.2	r5d, уменьшение
р. Кудепста–п. Кудепста	55.2	r1d, уменьшение
р. Мелек-Чесме–г. Керчь	27.5	cdd, уменьшение
р. Ворон–с. Ворон	28.6	–
р. Улу-Узень–с. Солнечногорское	27.3	epi, увеличение
р. Демерджи–г. Алушта	33.4	–
р. Цемес–г. Новороссийск	29.8	–
р. Бельбек–п. Куйбышево	28.8	–
р. Бага	30	epi, увеличение
р. Дерекойка–г. Ялта	29.7	–
р. Коккозка–с. Аромат	29.6	epi, увеличение
р. Учан-Су–г. Ялта	32.2	–
р. Нечепсухо–п. Новомихайловский	41.5	–

Анализ наиболее продолжительных рядов стационарных наблюдений на метеорологических станциях позволил выявить ряд особенностей. Для станций Крыма было выявлено увеличение индекса EPI (среднегодовая интенсивность экстремальных осадков) на метеостанции Феодосия, а также изменение индексов CWD (количество последовательных дней с осадками больше 1 мм) и CDD (продолжительность засушливых периодов) на метеостанции Ай-Петри за период 1961–2019 гг. [22]. В отличие от

Крыма, статистический анализ выявил положительные тренды других индексов: максимального количества осадков за пять дней (индекс  $r5d$ ) для Анапы и максимального количества осадков за одни сутки (индекс  $r1d$ ) для Туапсе за период 1961–2020 гг. Обработка спутниковых данных IMEGR показала, что на севере Черноморского побережья в 21 веке наблюдается статистически значимое увеличение среднегодовой интенсивности экстремальных осадков для некоторых водосборов рек Крымского полуострова и уменьшение абсолютных индексов ( $r1d$  и  $r5d$ ) для ЧПК (см. табл. 3). Однако стоит отметить, что в целом в настоящее время устойчивых трендов в изменчивости экстремальных осадков на Северном Кавказе и Крымском полуострове не выявлено [36, 72, 73].

Анализ синоптической ситуации, предшествующей отобраным событиям показал, что в зависимости от характеристик почвенного покрова, формирование ВЛП также зависит от предварительной увлажненности почвы. Во всех отмеченных случаях ВЛП выпадению экстремальных осадков предшествовали менее интенсивные дожди в условиях влажных субтропиков (рис. 5а), отсутствовали дожди в умеренном климате (рис. 5в) и сухих субтропиках (рис. 5б, 5г).

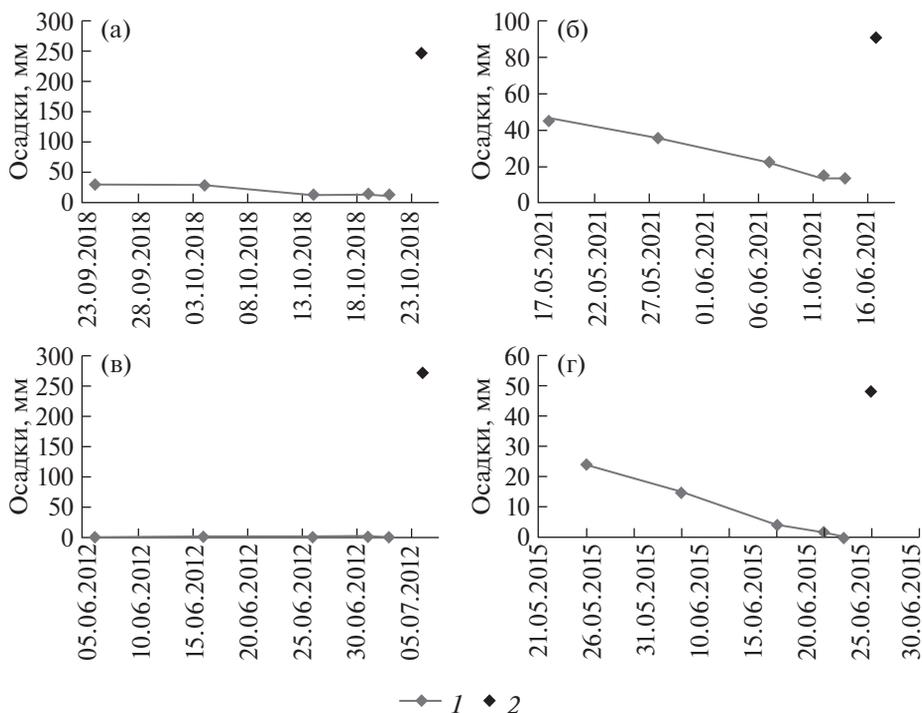
Изменчивость максимальной интенсивности выпадения осадков в период ВЛП характеризуется относительно небольшими пределами, причем для крупнейших событий (р. Адагум, 2012, р. Туапсе, 1991, 2010, 2018) наблюдалась отнюдь не максимальная интенсивность прошедших дождей, однако количество выпавших осадков соответствует очень редкой повторяемости (обеспеченность менее 1%).

Прошедшие события характеризуются очень высокой скоростью подъема уровня воды – порядка 1.2–1.3 м/ч, а максимальная зарегистрированная интенсивность роста составляет 1.7 м в течение 10 мин (р. Западный Дагомыс 24–25 октября 2018 г.) [55]. Подъем уровня воды происходил в течение очень быстрого времени, как правило, менее 5–6 ч [63], в отдельных случаях – порядка 20–40 мин [18, 55]. Наиболее разрушительные ВЛП характеризовались ростом уровня воды в течение 3–5 ч [3, 27], причем для ВЛП на р. Адагум максимальный рост уровня воды составил 7 м [12].

Сведения о стоке наносов при прохождении ВЛП крайне обрывочны и практически отсутствуют, однако есть сведения для рр. Хоста, Мезыбь, а также малой р. Цаньк, что их количество за одно событие (ВЛП) оказывается сопоставимо со среднегодовым стоком наносов [5, 13, 31, 55], что согласуется со сведениями, полученными для рек в других регионах мира [43, 44].

О значительном стоке наносов можно судить и по косвенным признакам, а именно значительным переформированиям руслового рельефа и речных долин в результате прохождения ВЛП. Практически во всех случаях ВЛП на Черноморском побережье становились причиной катастрофических преобразований рельефа за счет активизации эрозионных, обвальных, оползневых и других экзогенных процессов. Области зарождения ВЛП, как правило, приурочены к верхним звеньям речной сети [23], где преимущественно отсутствует активная хозяйственная деятельность, и где она, соответственно, не может оказать значительного воздействия на условия зарождения ВЛП, происходящего в основном под влиянием природных факторов. Однако наибольшей мощностью ВЛП достигает в предгорных и низкогорных районах, являющихся областями активного хозяйственного освоения и где соответственно наблюдаются основные последствия ВЛП. Здесь антропогенное воздействие может приводить к существенному увеличению проявления ВЛП и еще большей активизации процесса (увеличение коэффициентов стока на заасфальтированных территориях, искусственная концентрация стока и усиление размыва ниже по течению) [33]. Территория ЮБК и ЧПК в этом отношении не являются исключением.

Антропогенное воздействие может оказывать как прямое, так и косвенное воздействия на условия формирования и прохождения ВЛП. Наибольшее воздействие с точки зрения ВЛП оказывает сведение лесов, уничтожение растительного покрова



**Рис. 5.** Количество осадков за 3–5–10–15–30 дней до ВЛП; а – р. Туапсе – Туапсе, 28.10.2018, б – р. Учан-Су – Ялта, 17.06.2021, в – р. Адагум – Новороссийск, 06.07.2012, г – р. Мелек-Чесме – Керчь, 25.06.2015. 1 – количество осадков за 3–5–10–15–30 дней до ВЛП, мм, 2 – количество осадков, спровоцировавшее возникновение ВЛП, мм.

**Fig. 5.** Precipitation in 3–5–10–15–30 days before flash flood in the Tuapse River – Tuapse gauge on the 28th of October, 2018 (a), the Uchan-Su River – Yalta gauge on the 17th of June, 2021 (б), the Adagum River – Novorossiisk gauge on the 6<sup>th</sup> of July, 2012 (в), and the Melek-Chesme River – Kerch' on the 25<sup>th</sup> of June, 2015 (г). 1 – precipitation in 3–5–10–15–30 days before flash flood, 2 – precipitation initiated flash flood.

(включая пожары), выпас скота, неправильная распашка склонов, гидротехническое строительство, урбанизация. Гидротехническое строительство и водозабор оказывают прямое воздействие на режим водотоков. В случае выпадения экстремальных осадков нередко возникают случаи экстренного сброса воды из водохранилищ во избежание их перелива и последующего разрушения плотины из-за резкого повышения уровней воды и ее перелива через тело плотины. Это приводит к образованию катастрофических паводков ниже по течению от водохранилищ и прудов (подобная ситуация наблюдалась на р. Демерджи в 1997 г., а также 19 августа 2017 г., когда затоплению подверглись многие районы г. Алушты [18, 22]. Аналогичная ситуация также наблюдалась на территории Крымского полуострова в июне 2021 г., когда были размыты пруды на рр. Мелек-Чесме и Булганак в районе г. Керчь, а в Бахчисарайском районе был произведен экстренный спуск водоемов. Серьезные социально-экономические последствия ВЛП также связаны с такими особенностями хозяйственного воздействия, как неконтролируемая застройка территории и засорение русел [2, 20, 37].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы основные причины формирования ВЛП в речных бассейнах на Черноморском побережье Западного Кавказа и Крыма. Согласно выбранному алгоритму, разработана схема возможных вариантов формирования ВЛП в изучаемом регионе и собраны сведения о ВЛП в регионе за период 1990–2021 гг. Показано, что “движущим” фактором для начала ВЛП, как правило, выступают осадки высокой интенсивности. Однако нередко возникновение ВЛП и, главное, наиболее катастрофические последствия, возникают при совокупном сочетании различных факторов, характеризующих предшествующее состояние бассейна, достигшего некой “критической” точки и характеризующегося достаточным количеством накопленного на склонах материала, способного вовлекаться в движение. В таком случае спровоцировать начало ВЛП могут и осадки, не достигающие максимальных значений (слой и интенсивность) для данной территории. Антропогенные факторы редко выступают причиной, инициирующей возникновение ВЛП, но часто способствуют усилению их мощности, тем самым провоцируя рост негативных последствий ВЛП и значительный социально-экономический ущерб.

Статистический анализ данных наиболее продолжительных стационарных наблюдений за осадками позволил предположить, что вероятно, ВЛП на северном побережье Черного моря формируются чаще, чем фиксируются. Однако учитывая крайнюю неравномерность выпадения жидких осадков, особенно в горных районах, можно предположить, что данные наблюдений за осадками на стационарных постах не могут распространяться на близлежащие речные бассейны в связи с высокой пространственной вариабельностью ливневых дождей высокой интенсивности. Привлечение спутниковых данных IMERG позволило оценить количество экстремальных суточных сумм осадков (квантиль 0.99) в пределах исследуемых речных бассейнов, однако необходимо учитывать особенности их применения для изучаемой территории. Согласно выполненным оценкам, на севере Черноморского побережья в 21 веке наблюдается статистически значимое увеличение среднегодовой интенсивности экстремальных осадков для некоторых водосборов рек Крымского полуострова и уменьшение абсолютных индексов ( $r1d$  и  $r5d$ ) для ЧПК. В то же время по данным наземной сети, за длительный временной период 1961–2020 гг. наблюдается рост максимального количества осадков за пять дней (индекс  $r5d$ ) для станции Анапы и максимального количества осадков за одни сутки (индекс  $r1d$ ) для станции Туапсе.

Основными причинами возрастающего социально-экономического ущерба является несанкционированная хозяйственная деятельность на периодически затопляемых участках речных долин, а также отсутствие или снижение работ по расчистке и укреплению речных русел, отсутствие превентивных защитных мер в верхних звеньях речной сети, являющихся основными зонами зарождения ВЛП.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051200166-4 – анализ данных стационарных наблюдений), ГБ “Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия” (№ 121051400081-7 – анализ спутниковых данных IMERG) и в рамках темы № FMWZ-2023-0003 Государственного задания ИВП РАН (частичный анализ гидрологических данных) при финансовой поддержке РФФИ, проект номер 20-35-70035 (сбор и анализ данных о ВЛП на севере Черноморского побережья).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Беликов В.В., Кочетков В.В., Норин С.В. Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6–7 июля 2012 г. // Гидротехническое строительство. 2014. № 3. С. 29–35.
2. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерман К.П., Торопов П.А., Школьный Д.И., Белякова П.А. Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 1–14.  
<https://doi.org/10.7868/S032105961601003X>
3. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерманн К.П., Крыленко И.Н., Юмина Н.М., Айбулатов Д.Н., Ефремова Н.А. Стрoение и опасные гидрологические явления в Черноморской природно-экономической зоне побережья // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей: сб. науч. статей по итогам семинара. М., 2012. С. 4–16.
4. Анисимов А.Е., Ефимов В.В., Львова М.В. Верификация данных дистанционного зондирования GPM IMERG и количественные оценки атмосферных осадков в Крымском регионе в теплое время года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 4. С. 490–504.  
<https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-490-504>
5. Архипкин В.С., Добролюбов С.А., Мухаметов С.С., Недосапов А.А., Самборский Т.В., Самсонов Т.Е., Серебрянникова Е.А., Суркова Г.А. Экстремальный дождевой паводок в бассейне р. Ашамба и его влияние на рельеф дна и структуру вод моря в районе г. Геленджик // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2013. Т. 5. № 3. С. 27–34.
6. Баринoв А.Ю. Геоморфологический анализ ливневой селеопасности цели Широкая балка (Черноморское побережье Кавказа) // Геоморфология. 2010. № 2. С. 19–26.
7. Битюков Н.А., Ткаченко Ю.Ю., Денисов В.А. Максимальный и минимальный сток на реках Сочинского Причерноморья // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2019. № 4 (204). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/maksimalnyy-i-minimalnyy-stok-na-rekah-sochinskogo-prichernomorya> (дата обращения: 23.10.2021).
8. Болгов М.В., Коробкина Е.А. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 87–102.
9. Вахрушев Б.А. Районирование карста Крымского полуострова // Спелеология и карстология. 2009. № 3. С. 39–46.
10. Вишневская И.А., Денисов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Шапоренко С.И., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Голубчиков С.Н. Географо-гидрологическая оценка наводнений в российском Причерноморье // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. № 1. С. 131–146.  
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-131-146>
11. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ООО “ДЭКС-ПРЕСС”. 2003. 352 с.
12. Георгиевский В.Ю., Ткаченко Ю.Ю. Катастрофический паводок в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г. и его причины наводнение в бассейне р. Адагум. 2012. 42 с. <http://meteoweb.ru/biblio/27.pdf>.
13. Джаошвили Ш. Реки Черного моря. Технический отчет № 71. Европейское агентство по охране окружающей среды. 2002. 58 с.
14. Доклад о климатических рисках на территории РФ. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.
15. Ермакова Г.С., Горелиц О.В., Жбаков К.К., Землянов И.В., Милютина И.Ю. Экстремальные паводки на реках Крыма в 2021 году // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 460–473.  
<https://doi.org/10.31857/S0321059622040046>
16. Известия. URL: <https://iz.ru/1180696/2021-06-18/odin-chelovek-pogib-v-rezultate-podtoplenii-v-ialte> (дата обращения: 09.10.2021).
17. Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н. и др. Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. 2013. 204 с.
18. Клюкин А.А. Экзогеодинамика Крыма. 2007. 320 с.
19. Клюкин А.А. Экстремальные проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов в XX веке в Крыму // Геополитика и экзогеодинамика регионов. 2005. С. 27–38.
20. Кононова Н.К. Циркуляция атмосферы как фактор стихийных бедствий на Северном Кавказе в XXI веке // Геополитика и экзогеодинамика регионов. 2012. Т. 8. № 1–2. С. 72–103.
21. Котляков В.М., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Лихачёва Э.А., Маккавеев А.Н., Медведев А.А., Рудаков В.А. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске // Известия РАН. Серия географическая. 2012. № 6. С. 80–88.
22. Куксина Л.В., Голосов В.Н., Жданова Е.Ю., Цыленков А.С. Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в горном Крыму // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2021. № 5. С. 36–50.
23. Куксина Л.В., Голосов В.Н., Кузнецова Ю.С. Ливневые паводки в горах: изученность, распространение, факторы формирования // География и природные ресурсы, 2017. С. № 1.

- С. 25–35.  
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1\(25-35\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(25-35))
24. *Матишов Г.Г., Клеиценов А.В.* Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогност. Крымск, июль 2012 г. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН. 2012. 128 с.
  25. Методические указания республиканского и территориального управления по гидрометеорологии и контролю природной среды № 92. Определение максимальных расходов воды по меткам уровня высоких вод / Сост.: *Б.М. Доброумов, Г.А. Любимов*. Л.: Гидрометеоздат, 1979. с. 61.
  26. *Овчарук В.А., Тодорова Е.И.* Статистические параметры максимальных расходов воды и слоев паводочного стока для рек Горного Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. 10(1). С. 766–770.
  27. *Панов Д.В., Базелюк А.А., Лурье П.М.* Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону, 2012. 605 с.
  28. *Семенов В.А., Алёшина М.А.* Сценарные прогнозы изменений температурного и гидрологического режима Крыма в XXI веке по данным моделей климата CMIP6 // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 506–516.  
<https://doi.org/10.31857/S0321059622040174>
  29. *Ткаченко Ю.Ю.* Опасные гидрометеорологические явления на Черноморском побережье, связанные с выпадением сильных осадков // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей: сб. науч. статей по итогам семинара. М., 2012. С. 42–45.
  30. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды URL: [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru) (дата обращения: 14.11.2020).
  31. *Цыпленков А.С., Иванова Н.Н., Ботавин Д.В., Кузнецова Ю.С., Голосов В.Н.* Гидрометеорологические предпосылки и геоморфологические последствия экстремального паводка в бассейне малой реки в зоне влажных субтропиков (на примере р. Цаньк, район Сочи) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. 66(1). С. 144–166.  
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.109>
  32. *Чернявский А.С.* Селевой морфолитогенез на Черноморском побережье Кавказа (в пределах Краснодарского края). Автореферат на соискание ученой степени кандидата географических наук. Краснодар: Центр Универсервис, 2010. 23 с.
  33. *Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н.* Причины и последствия техногенной активизации селей в 2006–2019 гг. на водосборе притока руч. Сулимовский (район пос. Красная Поляна, Западный Кавказ) // Геориск. 2020. Т. 14. № 2. С. 66–76.
  34. *Шныпарков А.Л., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф.* Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2013. № 3. С. 42–48.
  35. Эксперт Юг. URL: <https://expertsouth.ru/news/navodneniya-na-kubani-zabytye-uroki-krumnskogo-pavodka/> (дата обращения: 11.10.2021).
  36. *Aleshina M.A., Toropov P.A., Semenov V.A.* Temperature and humidity regime changes on the Black Sea coast in 1982–2014 // Rus. Meteor. Hydrol. 2018. № 4. С. 41–53.  
<https://doi.org/10.3103/S1068373918040040>
  37. *Alexeevsky N., Magritsky D.V., Koltermann K.P., Krylenko I., Toropov P.* Causes and systematic of inundations of the Krasnodar territory on the Russian Black Sea coast // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2016. № 16. P. 1289–1308.  
<https://doi.org/10.5194/nhess-16-1289-2016>
  38. *Archer D., Fowler H.* Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain // Journal of Flood Risk Management. 2015.  
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12187>
  39. *Baburin V.L., Gavrilova S.A., Koltermann P., Seliverstov Y.G., Sokratov S.A., Shnyparkov A.L.* Quantification of economic and social risks of debris flows for the Black Sea coastal region of the North Caucasus // Geography, environment, sustainability. 2014. № 7. P. 108–122.
  40. *Baran-Zgłobicka B., Godziszewska D., Zgłobicki W.* The Flash Floods Risk in the Local Spatial Planning (Case Study: Lublin Upland, E Poland) // Resources. 2021. V. 10. № 14.  
<https://doi.org/10.3390/resources10020014>
  41. *Belyakova P., Shikhov A., Perminov S., Moreydo V.* Accuracy assessment of heavy rainfall forecasting in the Western Caucasus with ICON-Eu regional atmospheric model for short-term flood forecasting // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 611. DOI: 012049.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012049>
  42. *Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M.* Hydrogeomorphic Response to Extreme Rainfall in Headwater Systems: Flash Floods and Debris Flows // Journal of Hydrology. 2014. V. 518. P. 194–205.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
  43. *Cohen H., Laronne J.B.* High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel // Hydrological Processes. 2005. V. 19. P. 1687–1702.

44. *Cohen H., Laronne J.B., Reid I.* Simplicity and complexity of bed load response during flash floods in a gravel bed ephemeral river: A 10 year field study // *Water Resources Research*. 2010. V. 46. <https://doi.org/10.1029/2010WR009160>
45. *Costa J.E., Jarrett R.D.* An evaluation of selected extraordinary floods in the United States reported by the US geological survey and implications for future Advancement of Flood Science // *US Geological Survey, Scientific Investigations Report*. 2008. № 5164. 52 p.
46. *Doocy S., Daniels A., Murray S., Kirsch T.D.* The Human Impact of Floods: A Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review // *PLoS Curr*. 2013. V. 5. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a>
47. *Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaškovičová L., Blöschl G., Borga M., Dumitrescu A. et al.* A Compilation of Data on European Flash Floods // *Journal of Hydrology*. 2009. V. 367. P. 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
48. *Gergedava B.A.* Types of clastokarst caves of the Caucasus // *Soviet Geography*. 1988. V. 29(5). P. 514–528. <https://doi.org/10.1080/00385417.1988.10640723>
49. Global Precipitation Measurement. Available online: <https://gpm.nasa.gov/data/imerg> (accessed on 23 September 2021).
50. *Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N.* Trends in Intense Precipitation in the Climate Record // *Journal of Climate*. 2005. V. 18. P. 1326–1350. <https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>
51. *Groisman P.Y., Knight R.W., Karl T.R., Easterling D.R., Sun B., Lawrimore J.H.* Contemporary Changes of the Hydrological Cycle over the Contiguous United States: Trends Derived from In Situ Observations // *Journal of Hydrometeorology*. 2004. V. 5. P. 64–85. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0064:CCOTHC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0064:CCOTHC>2.0.CO;2)
52. IPCC SIX Assessment Report. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (accessed on 9 September 2021).
53. *Jarett R.* Errors in slope-area computations of peak discharges in mountain streams // *J. Hydrol*. 1987. V. 96 (1–4). P. 53–67. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90143-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90143-0)
54. *Jonkman S.N.* Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods // *Nat Hazards*. 2005. V. 34. P. 151–175. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-8891-3>
55. *Korshenko E., Zhurbas V., Osadchiv A., Belyakova P.* Fate of river-borne floating litter during the flooding event in the northeastern part of the Black Sea in October 2018 // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. V. 160. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111678>
56. *Kuksina L., Golosov V.* Flash Floods: Formation, Study and Distribution // *E3S Web Conf*. 2020. V. 163. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016302005>
57. *Li X., Hu Q.* Spatiotemporal Changes in Extreme Precipitation and Its Dependence on Topography over the Poyang Lake Basin, China // *Advances in Meteorology*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1253932>
58. *Lumbroso D., Gaume E.* Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges // *J. Hydrol*. 2012. V. 414–415. P. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>
59. *Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E.* Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management // *J. Hydrol*. 2010. V. 394(1–2). P. 118–133.
60. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V.* Crucial Role of Black Sea Warming in Amplifying the 2012 Krymsk Precipitation Extreme // *Nature Geosci*. 2015. V. 8. P. 615–619. <https://doi.org/10.1038/ngeo2483>
61. *Mueller E.N., Pfister A.* Increasing Occurrence of High-Intensity Rainstorm Events Relevant for the Generation of Soil Erosion in a Temperate Lowland Region in Central Europe // *Journal of Hydrology*. 2011. V. 411. P. 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.005>
62. *Poesen J.W.A., Hooke J.M.* Erosion, Flooding and Channel Management in Mediterranean Environments of Southern Europe // *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 1997. V. 21. P. 157–199. <https://doi.org/10.1177/030913339702100201>

63. *Rajah K., O'Leary T., Turner A., Petrakis G., Leonard M., Westra S.* Changes to the Temporal Distribution of Daily Precipitation // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 8887–8894. <https://doi.org/10.1002/2014GL062156>
64. *Soto A.U., Madrid-Aris M.* Roughness coefficient in mountain rivers // *American Society of Civil Engineering. Hydraulics Engineering*. 1994. P. 652–656.
65. *Sungmin O., Ulrich F.* Assessment of spatial uncertainty of heavy rainfall at catchment scale using a dense gauge network // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2019. V. 23. P. 2863–2875. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2863-2019>
66. *Tashilova A., Ashabokov B., Kesheva L., Teunova N.V.* Analysis of climate change in the Caucasus region: and of the 20<sup>th</sup>–beginning of the 21<sup>st</sup> century // *Climate*. 2019. V. 7(11). <https://doi.org/cli7010011>
67. The Flood Observatory Available online: <http://floodobservatory.colorado.edu/> (accessed on 18 January 2022).
68. *Tripoli G.J., Medaglia C.M., Dietrich S., Mugnai A., Panegrossi G., Pinori S., Smith E.A.* The 9–10 November 2001 Algerian Flood A Numerical Study // *American meteorological society*. 2005. P. 1229–1236.
69. US Department of Commerce, N. Flash Flooding Definition Available online: <https://www.weather.gov/phi/FlashFloodingDefinition> (accessed on 18 January 2022).
70. Vkontakte. Available online: [https://vk.com/wall-42886009\\_1149515](https://vk.com/wall-42886009_1149515) (accessed on 17 August 2021).
71. *Voskresenskaya E., Vyshkvarikova E.* Extreme precipitation over the Crimean peninsula // *Quarterly International*. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.097>
72. *Vyshkareva E.* Changes in extreme precipitation over the North Caucasus and the Crimean Peninsula during 1961–2018 // *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. 2021. V. 125(2). P. 321–336. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.8>
73. *Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Kapala A., Gulev S.* Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges // *J. Hydrometeorol.* 2009. V. 10. P. 701–716. <https://doi.org/10.1175/2008JHM1055.1>

### Stochastic Parameters of Flash Floods Formation in the North of the Black Sea Coast

L. V. Kuksina<sup>1, \*</sup>, P. A. Beljakova<sup>2, \*\*</sup>, V. N. Golosov<sup>1, \*\*\*</sup>, E. Ju. Zhdanova<sup>1, \*\*\*\*</sup>,  
M. M. Ivanov<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>, and A. L. Gurinov<sup>3, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (WPI RAS), Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences (IGRAS), Moscow, Russia*

\*E-mail: [ludmilakuksina@gmail.com](mailto:ludmilakuksina@gmail.com)

\*\*E-mail: [pobel@mail.ru](mailto:pobel@mail.ru)

\*\*\*E-mail: [gollossov@gmail.com](mailto:gollossov@gmail.com)

\*\*\*\*E-mail: [ekaterinzhdanova214@gmail.com](mailto:ekaterinzhdanova214@gmail.com)

\*\*\*\*\*E-mail: [ivanovm@bk.ru](mailto:ivanovm@bk.ru)

\*\*\*\*\*E-mail: [gurinov.artem@gmail.com](mailto:gurinov.artem@gmail.com)

**Abstract**—Flash floods are one of the most dangerous hydrometeorological events all over the World. In the current paper stochastic parameters of flash floods formation are studied on the basis of data on flash floods in 1990–2021 in the small river basins of the Caucasus and Crimea Black Sea Coast. The main factor of flash floods formation is heavy rain, but in some cases its occurrence could depend on critical combination of various factors. Flash floods are usually formed in summer-autumn period in the studied region with the maximum of observed events in August. They are characterised by very rapid water level rise of about 1.2–1.3 m/h. Sediment yield during one flash flood could be compared with mean annual values. Statistical analysis of precipitation long ranges demonstrates probability of more often flash floods occurrence in the region in comparison with observed events.

**Keywords:** flash flood, heavy rain, intensity, precipitation, small river basin, the Black Sea Coast, Caucasus, Crimea

## REFERENCES

1. Alekseyevskiy N.I., Krylenko I.N., Belikov V.V., Kochetkov V.V., Norin S.V. Chislennoye gidrodinamicheskoye modelirovaniye navodneniya v g. Krymske 6–7 iyulya 2012 g. // *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2014. № 3. S. 29–35.
2. Alekseyevskiy N.I., Magritskiy D.V., Kolterman K.P., Toropov P.A., Shkol'nyy D.I., Belyakova P.A. Navodneniya na Chernomorskom poberezh'ye Krasnodarskogo kraya // *Vodnyye resursy*. 2016. T. 43. № 1. S. 1–14.
3. Alekseyevskiy N.I., Magritskiy D.V., Koltermann K.P., Krylenko I.N., Yumina N.M., Aybulatov D.N., Yefremova N.A. Stroyeniye i opasnyye gidrologicheskiye yavleniya v Chernomorskoj prirodno-ekonomicheskoy zone poberezh'ya // *Prirodnyye i sotsial'nyye riski v beregovoy zone Chernogo i Azovskogo morey*. 2012. S. 4–16.
4. Anisimov A.Ye., Yefimov V.V., L'vova M.V. Verifikatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya GPM IMERG i kolichestvennyye otsenki atmosferykh osadkov v Krymskom regione v teploye vremya goda // *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*. 2021. T. 37. № 4. S. 490–504. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-490-504>
5. Arkhipkin V.S., Dobrolyubov S.A., Mukhametov S.S., Nedosapov A.A., Samborskiy T.V., Samsonov T.Ye., Serebryannikova Ye.A., Surkova G.A. Ekstremal'nyy dozhdevoy pavodok v bassejne r. Ashamba i yego vliyaniye na rel'yef dna i strukturu vod morya v rayone g. Gelendzhik // *Vestnik MGU. Seriya 5. Geografiya*. 2013. T. 5. № 3. S. 27–34.
6. Barinov A.Yu. Geomorfologicheskij analiz livevoy seleopasnosti tseli Shirokaya balka (Chernomorskoye poberezh'ye Kavkaza) // *Geomorfologiya*. 2010. № 2. S. 19–26.
7. Bitukov N.A., Tkachenko Yu.Yu., Denisov V.A. Maksimal'nyy i minimal'nyy stok na rekakh Sochinskogo Prichernomor'ya // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki*. 2019. № 4(204). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/maksimalny-i-minimalnyy-stok-na-rekakh-sochinskogo-prichernomor'ya> (data obrashcheniya: 23.10.2021).
8. Bolgov M.V., Korobkina Ye.A. Rekonstruktsiya dozhdevoogo pavodka na reke Adagum na osnove matematicheskikh modeley formirovaniya stoka // *Vodnoye khozyaystvo Rossii*. 2013. № 3. S. 87–102.
9. Vakhrushev B.A. Rayonirovaniye karsta Krymskogo poluoostrova // *Speleologiya i karstologiya*. 2009. № 3. S. 39–46.
10. Vishnevskaya I.A., Denisov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Shaporenko S.I., Kireyeva M.B., Frolova N.L., Rets Ye.P., Golubchikov S.N. Geografo-gidrologicheskaya otsenka navodneniy v rossiyskom Prichernomor'ye // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2016. (1). 131–146.
11. Vorob'yev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Katastroficheskiye navodneniya nachala XXI veka: uroki i vyvody. M.: OOO "DEKS-PRESS", 2003. 352 s.
12. Georgiyevskiy V.Yu., Tkachenko Yu.Yu. Katastroficheskiy pavodok v bassejne r. Adagum 6–7 iyulya 2012 g. i yego prichiny navodneniya v bassejne r. Adagum. 2012. 42 s. <http://meteoweb.ru/biblio/27.pdf>.
13. Dzhaoshvili S.H. Reki Chernogo morya. Tekhnicheskij otchet № 71. Yevropeyskoye agentstvo po okhrane okruzhayushchey sredy. 2002. 58 s.
14. Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii RF. Sankt-Peterburg, 2017. 106 s.
15. Yermakova G.S., Gorelits O.V., Zhbakov K.K., Zemlyanov I.V., Milyutina I.Yu. Ekstremal'nyye pavodki na rekakh Kryma v 2021 godu // *Vodnyye resursy*. 2022. T. 49. № 4. S. 460–473. <https://doi.org/10.31857/S0321059622040046>
16. *Izvestiya*. URL: <https://iz.ru/1180696/2021-06-18/odin-chelovek-pogib-v-rezultate-podtoplenii-v-ialte> (data obrashcheniya: 09.10.2021).
17. Klimchuk A.B., Timokhina Ye.I., Amelichev G.N. i dr. Ggipogenyy karst Predgornogo Kryma i yego geomorfologicheskaya rol'. 2013. 204 s.
18. Klyukin A.A. Ekzogodinamika Kryma. 2007. 320 s.
19. Klyukin A.A. Ekstremal'nyye proyavleniya neblagopriyatnykh i opasnykh ekzogennykh protsessov v KHKH veke v Krymu // *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*. 2005. S. 27–38.
20. Kononova N.K. Tsirkulyatsiya atmosfery kak faktor stikhiynykh bedstviy na Severnom Kavkaze v XXI veke // *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*. 2012. T. 8. № 1–2. S. 72–103.
21. Kotlyakov V.M., Desinov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Likhachova E.A., Makkaveyev A.N., Medvedev A.A., Rudakov V.A. Navodneniya 6–7 iyulya 2012 goda v gorode Krymske // *Izvestiyai RAN. Seriya geograficheskaya*. 2012. № 6. S. 80–88.
22. Kuksina L.V., Golosov V.N., Zhdanova Ye.Yu., Tsyplenkov A.S. Gidrologo-klimaticheskiye faktory formirovaniya ekstremal'nykh erozionnykh sobytiy v gornom Krymu // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2021. № 5. C. 36–50.
23. Kuksina L.V., Golosov V.N., Kuznetsova Yu.S. Livnevyye pavodki v gorakh: izuchennost', rasprostraneniye, faktory formirovaniya // *Geografiya i prirodnyye resursy*, 2017. S. № 1. S. 25–35. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1\(25-35\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(25-35))
24. Matishov G.G., Kleshchenkov A.V. Kubanskiy pavodkovyy krizis. Klimat, geomorfologiya, prognoz. Krymsk, iyul' 2012 g. Rostov-na-Donu: YUNTS RAN. 2012. 128 s.

25. Metodicheskiye ukazaniya respublikanskogo i territorial'nogo upravleniya po gidrometeorologii i kontrolyu prirodnoy sredy № 92. Opredeleniye maksimal'nykh raskhodov vody po metkam urovnya vysokikh vod / Sost. B.M. Dobroumov, G.A. Lyubimov. L.: Gidrometeoizdat, 1979. s. 61.
26. Ovcharuk V.A., Todorova Ye.I. Statisticheskiye parametry maksimal'nykh raskhodov vody i sloyev pavodchnogo stoka dlya rek Gornogo Kryma // Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2014. 10(1). S. 766–770.
27. Panov D.V., Bazelyuk A.A., Lur'ye P.M. Reki Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza: gidrografiya i rezhim stoka. Rostov-na-Donu, 2012. 605 s.
28. Semenov V.A., Aloshina M.A. Stsenarnyye prognozy izmeneniy temperaturnogo i gidrologicheskogo rezhima Kryma v XXI veke po dannym modeley klimata CMIP6 // Vodnyye resursy. 2022. T. 49. № 4. S. 506–516.  
<https://doi.org/10.31857/S0321059622040174>
29. Tkachenko Yu.Yu. Opasnyye gidrometeorologicheskiye yavleniya na Chernomorskom poberezh'ye, svyazannyye s vypadeniyem sil'nykh osadkov // Prirodnyye i sotsial'nyye riski v beregovoy zone Chernogo i Azovskogo morey. 2012. S. 42–45.
30. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy URL: [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru) (data obrashcheniya: 14.11.2020).
31. Tsyplenkov A.S., Ivanova N.N., Botavin D.V., Kuznetsova Yu.S., Golosov V.N. Gidrometeorologicheskiye predposylki i geomorfologicheskiye posledstviya ekstremal'nogo pavodka v bassejne maloy reki v zone vlazhnykh subtropikov (na primere r. Tsanyk, rayon Sochi) // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. 2021. 66(1). S. 144–166.  
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.109>
32. Chernyavskiy A.S. Selevoy morfolitogenez na Chernomorskom poberezh'ye Kavkaza (v predelakh Krasnodarskogo kraya). Avtoreferat na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata geograficheskikh nauk. Krasnodar: Tsentri Universervis, 2010. 23 s.
33. Shvarev S.V., Kharchenko S.V., Golosov V.N. Prichiny i posledstviya tekhnogennoy aktivizatsii seley v 2006–2019 gg. na vodosbore pritoka ruch. Sulimovskiy (rayon pos. Krasnaya Polyana, Zapadnyy Kavkaz) // Georisk. 2020. T. 14. № 2. S. 66–76.
34. Shnyparkov A.L., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Perov V.F. Selevoy risk na Chernomorskom poberezh'ye Kavkaza // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2013. № 3. S. 42–48.
35. Ekspert Yug. URL: <https://expertsouth.ru/news/navodneniya-na-kubani-zabytye-uroki-krymskogo-pavodka/> (data obrashcheniya: 11.10.2021).
36. Aleshina M.A., Toropov P.A., Semenov V.A. Temperature and humidity regime changes on the Black Sea coast in 1982–2014. Rus. Meteor. Hydrol., 2018. 4. 41–53.  
<https://doi.org/10.3103/S1068373918040040>
37. Alexeevsky N., Magritsky D.V., Koltermann K.P., Krylenko I., Toropov P. Causes and systematic of inundations of the Krasnodar territory on the Russian Black Sea coast. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2016. 16. 1289–1308.
38. Archer D., Fowler H. Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. Journal of Flood Risk Management, 2015.  
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12187>
39. Baburin V.L., GavriloVA S.A., Koltermann P., Seliverstov Y.G., Sokratov S.A., Shnyparkov A.L. Quantification of economic and social risks of debris flows for the Black Sea coastal region of the North Caucasus // Geography, environment, sustainability. 2014. 7. P. 108–122.
40. Baran-Zgłobicka B., Godziszewska D., Zgłobicki W. The Flash Floods Risk in the Local Spatial Planning (Case Study: Lublin Upland, E Poland). Resources 2021. 10. 14.  
<https://doi.org/10.3390/resources10020014>
41. Belyakova P., Shikhov A., Perminov S., Moreydo V. Accuracy assessment of heavy rainfall forecasting in the Western Caucasus with ICON-Eu regional atmospheric model for short-term flood forecasting // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 611.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012049>
42. Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M. Hydrogeomorphic Response to Extreme Rainfall in Headwater Systems: Flash Floods and Debris Flows. Journal of Hydrology 2014. 518. 194–205.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
43. Cohen H., Laronne J.B. High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel. Hydrological Processes, 2005. 19. 1687–1702.
44. Cohen H., Laronne J.B., Reid I. Simplicity and complexity of bed load response during flash floods in a gravel bed ephemeral river: A 10 year field study, Water Resources Research, 2010. 46. W11542.
45. Costa J.E., Jarrett R.D. An evaluation of selected extraordinary floods in the United States reported by the US geological survey and implications for future Advancement of Flood Science. US Geological Survey, Scientific Investigations Report, 2008. № 5164 52 p.

46. Doocy S., Daniels A., Murray S., Kirsch T.D. The Human Impact of Floods: A Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review. *PLoS Curr* 2013. 5.  
<https://doi.org/10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a>.
47. Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaškovičová L., Blöschl G., Borga M., Dumitrescu A. et al. A Compilation of Data on European Flash Floods. *Journal of Hydrology* 2009. 367. 70–78.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
48. Gergedava B.A. Types of clastokarst caves of the Caucasus. *Soviet Geography*, 1988. 29(5). 514–528.  
<https://doi.org/10.1080/00385417.1988.10640723>
49. Global Precipitation Measurement. Available online: <https://gpm.nasa.gov/data/imerg> (accessed on 23 September 2021).
50. Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. *Journal of Climate* 2005. 18. 1326–1350.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>
51. Groisman P.Y., Knight R.W., Karl T.R., Easterling D.R., Sun B., Lawrimore J.H. Contemporary Changes of the Hydrological Cycle over the Contiguous United States: Trends Derived from In Situ Observations. *Journal of Hydrometeorology* 2004. 5. 64–85.  
[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0064:CCOTHC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0064:CCOTHC>2.0.CO;2)
52. IPCC SIX Assessment Report. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (accessed on 9 September 2021).
53. Jarett R. Errors in slope-area computations of peak discharges in mountain streams. *J. Hydrol.*, 1987. 96 (1–4). 53–67.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90143-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90143-0)
54. Jonkman S.N. Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods. *Nat Hazards* 2005. 34. 151–175.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-004-8891-3>
55. Korshenko E., Zhurbas V., Osadchiv A., Belyakova P. Fate of river-borne floating litter during the flooding event in the northeastern part of the Black Sea in October 2018. *Marine Pollution Bulletin*, 2020. 160.  
<https://doi.org/111678.10.1016/j.marpolbul.2020.111678>
56. Kuksina L., Golosov V. Flash Floods: Formation, Study and Distribution // *E3S Web Conf.* 2020. V. 163.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016302005>
57. Li X., Hu Q. Spatiotemporal Changes in Extreme Precipitation and Its Dependence on Topography over the Poyang Lake Basin, China. *Advances in Meteorology*, 2019. e1253932.  
<https://doi.org/10.1155/2019/1253932>
58. Lumbroso D., Gaume E. Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *J. Hydrol*, 2012. 414–415. 16–30.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>
59. Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *J. Hydrol.* 2010. 394(1–2). 118–133.
60. Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V. Crucial Role of Black Sea Warming in Amplifying the 2012 Krymsk Precipitation Extreme. *Nature Geosci* 2015. 8. 615–619.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo2483>
61. Mueller E.N., Pfister A. Increasing Occurrence of High-Intensity Rainstorm Events Relevant for the Generation of Soil Erosion in a Temperate Lowland Region in Central Europe. *Journal of Hydrology* 2011. 411. 266–278.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.005>
62. Poesen J.W.A., Hooke J.M. Erosion, Flooding and Channel Management in Mediterranean Environments of Southern Europe. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 1997. 21. 157–199.  
<https://doi.org/10.1177/030913339702100201>
63. Rajah K., O’Leary T., Turner A., Petrakis G., Leonard M., Westra S. Changes to the Temporal Distribution of Daily Precipitation. *Geophysical Research Letters* 2014. 41. 8887–8894.  
<https://doi.org/10.1002/2014GL062156>
64. Soto A.U., Madrid-Aris M. Roughness coefficient in mountain rivers. *American Society of Civil Engineering. Hydraulics Engineering*, 1994. 652–656.
65. Sungmin O., Ulrich F. Assessment of spatial uncertainty of heavy rainfall at catchment scale using a dense gauge network. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2019. 23. 2863–2875,  
<https://doi.org/10.5194/hess-23-2863-2019>

66. Tashilova A., Ashabokov B., Kesheva L., Teunova N.V. Analysis of climate change in the Caucasus region: and of the 20th–beginning of the 21th century. *Climate*, 2019. 7(11). <https://doi.org/cli7010011>
67. The Flood Observatory Available online: <http://floodobservatory.colorado.edu/> (accessed on 18 January 2022).
68. Tripoli G.J., Medaglia C.M., Dietrich S., Mugnai A., Panegrossi G., Pinori S., Smith E.A. The 9–10 November 2001 Algerian Flood A Numerical Study. *American meteorological society*, 2005. 1229–1236.
69. US Department of Commerce, N. Flash Flooding Definition Available online: <https://www.weather.gov/phi/FlashFloodingDefinition> (accessed on 18 January 2022).
70. Vkontakte. Available online: [https://vk.com/wall-42886009\\_1149515](https://vk.com/wall-42886009_1149515) (accessed on 17 August 2021).
71. Voskresenskaya E., Vyshkvarkova E. Extreme precipitation over the Crimean peninsula. *Quaternary International*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.097>
72. Vyshkareva E. Changes in extreme precipitation over the North Caucasus and the Crimean Peninsula during 1961–2018. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 2021. 125. 2. 321–336.
73. Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Kapala A., Gulev S. Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges. *J. Hydrometeorol.* 2009. 10. 701–716. <https://doi.org/10.1175/2008JHM1055.1>