

ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 556.04+556.166

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПАВОДКИ НА РЕКАХ КРЫМА В 2021 ГОДУ¹

© 2022 г. Г. С. Ермакова^{a, b, *}, О. В. Горелиц^{a, b}, К. К. Жбаков^{a, b},
И. В. Землянов^b, И. Ю. Милютина^{a, b}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bГосударственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова,
Росгидромет, Москва, 119034 Россия

*e-mail: ermakova_gs@mail.ru

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 25.01.2022 г.

Принята к публикации 28.01.2022 г.

Представлены результаты исследований экстремальных паводков, прошедших на реках Крыма летом 2021 г. Проведено аналитическое и историческое обобщение проблемы негативного воздействия вод и селевых потоков в Крыму, выполнен анализ факторов формирования паводков и селей на реках Крыма в 2021 г. Проведена оценка максимальных расходов и уровней воды паводков, детально исследована динамика распространения волны паводка в бассейне р. Бельбек. Отмечена уникальность произошедших опасных гидрологических явлений, дана оценка их негативных последствий.

Ключевые слова: Крым, паводки, максимальные расходы воды, затопления, негативное воздействие вод.

DOI: 10.31857/S0321059622040046

ВВЕДЕНИЕ

Летом 2021 г. на реках Крыма прошла серия экстремальных паводков, в результате которых были зафиксированы обширные затопления населенных пунктов и активизация опасных эрозионных и русловых процессов. Цель настоящей работы – исследование причин формирования, анализ условий прохождения, оценка экстремальности прошедших паводков и их негативных последствий.

Для исследования выбраны бассейны рек, расположенные в трех районах Крыма и различающихся по условиям формирования и прохождения паводков. На основе анализа материалов, предоставленных Крымским УГМС, а также информации из СМИ и открытых интернет-источников, из обширного перечня рек, на которых летом 2021 г. были зафиксированы паводки, были выбраны бассейны тех рек, на которых произошли наиболее значимые по масштабу и последствиям события:

бассейны рек Дерекойка и Учан-Су (Ялта) – паводок/сель 17–18 июня;

бассейны рек Мелек-Чесме, Катерлез и Булганак (Керчь) – паводки 17–18 июня и 12–16 августа; бассейн р. Бельбек – паводок 4–5 июля.

Актуальность проведенного исследования имеет два различных аспекта.

Первый аспект – чисто практический – в целях обеспечения водной безопасности Крыма необходима объективная оценка негативных явлений и причин их формирования. Согласно данным МЧС [10], сели и паводки по числу вызванных ими смертей относятся к двум самым опасным природным явлениям в Крыму. Как показано ниже, случившиеся летом 2021 г. на реках Крыма паводки были выдающимися по своим гидрологическим характеристикам. И настолько же “выдающимся” было их негативное воздействие, принесенный ущерб населению и объектам инфраструктуры.

Второй аспект связан с более глобальными вопросами. Многие исследователи указывают на повышение экстремальности гидрологических явлений на реках России (в том числе и на территории Крыма) и Европы в период с конца XX в. по настоящее время, что связывается в первую очередь с климатическим фактором [3, 6, 21, 36, 38, 39, 41–43]. Согласно большинству прогнозов, эта тенденция сохранится и в будущем, поэтому важно понимать, как эти события формируются и ка-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № 0126-2021-0001, государственная регистрация № 121040700170-9).

кие последствия влекут за собой. Прошедшие летом 2021 г. паводки на реках Крыма могут быть еще одним звеном в ряду таких экстремальных событий.

В работе использован обширный объем исходной информации — как архивной (базы данных инструментальных наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками на гидрологических постах и метеостанциях Крымского УГМС, научные публикации, литературные источники по теме исследования, публикации в СМИ), так и актуальной, полученной коллективом авторов в процессе выполнения комплексных полевых работ в сентябре 2021 г.

ПРОБЛЕМА НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОД И СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ В КРЫМУ

Характерная особенность гидрологического режима рек и временных водотоков Крыма — формирование паводков в течение всего года вследствие интенсивных ливневых осадков или при интенсивном снеготаянии с одновременным выпадением осадков [33]. В горных областях, особенно в регионе Южного берега Крыма (ЮБК) на участке от Ялты до Судака, где в овражно-балочной сети и долинах рек имеется достаточно большое количество обломочного материала, паводки зачастую проходят в виде разрушительных грязекаменных и водокаменных селей.

Богатый опыт научных исследований и обобщений по паводкам и селям [4, 5, 13, 16–18, 21, 22, 27–30, 33], а также широкое освещение темы опасных явлений в публикациях МЧС [10, 20], ежегодных изданиях исполнительных властей Крыма [11] и СМИ позволил авторам создать базу данных по негативному воздействию вод и селевых потоков в Крыму. Собран каталог событий, зафиксированных на территории Крыма за период с 1815 г. по настоящее время, — всего 153 события с указанием времени и места, возможных причин и негативных последствий. Собранный каталог свидетельствует о том, что экстремальные гидрологические явления, вызывающие негативные последствия, — не редкость для региона. Анализ материалов позволяет сделать некоторые обобщения пространственной и временной неоднородности негативных явлений. На рис. 1 представлена карта распространения негативных событий по территории Крыма, которая наглядно демонстрирует географию явлений: сели тяготеют к региону ЮБК, затопления характерны для территорий вдоль крупных рек — Альмы, Качи, Бельбека, Салгира, подтопления — для степных районов на севере Крыма, лишенных развитой гидрографической сети и постоянных водотоков.

Наиболее высок риск негативных последствий паводков и селей — на территории городских

округов Судака, Алушты, Ялты, Феодосии и Керчи, а также Бахчисарайского и Симферопольского районов. Это связано, с одной стороны, с наибольшей частотой формирования в этих районах экстремальных гидрометеорологических явлений, а с другой стороны — с наибольшей плотностью населения и застройки.

В историческом аспекте также выделяются определенные тенденции — активизации и затухания опасных процессов, приводящих к негативным последствиям. На рис. 2 приведена диаграмма изменения количества экстремальных событий по десятилетиям. Степень освещенности недавних событий гораздо выше, чем у событий, произошедших 50–100 лет назад. Поэтому максимум числа экстремальных событий в последнее десятилетие — отражение не увеличения активности негативных явлений по сравнению с предыдущими десятилетиями, а скорее степени подробности освещения вопроса в источниках информации. Анализ диаграммы на рис. 2 позволяет сделать выводы относительно общих тенденций изменения количества негативных явлений. В частности, обращает на себя внимание относительное увеличение количества событий в 1910-е, 1960-е и 1990-е гг. В то время как 1920–1930-е, 1950-е и 1970-е гг. характеризуются относительным уменьшением количества негативных явлений. Имеет место чередование периодов повышенной и пониженной активности.

Скорее всего, это связано с колебаниями метеорологических показателей, так как именно они — главный фактор формирования негативных явлений. Так, в [17] активизация селей в Крыму связывается с периодами повышения солнечной активности, а также с нарушением зональной циркуляции и усилением меридионального переноса воздушных масс.

Анализ локальных годовых максимумов показал, что наиболее выдающимся годом по количеству событий (13) за весь анализируемый период был 1997 г., который, по данным метеостанции Ай-Петри, был также и наиболее выдающимся по количеству дней (47) с осадками >10 мм за весь период наблюдений (1896–2021 г.).

АНАЛИЗ ПРИЧИН ФОРМИРОВАНИЯ ПАВОДКОВ 2021 г.

Паводки в Крыму формируются под воздействием гидрометеорологических условий и факторов подстилающей поверхности. К гидрометеорологическим условиям относится количество выпадающих осадков, их интенсивность, продолжительность. К факторам подстилающей поверхности относятся характеристики водосбора, определяющие потерю стока, скорость добегания воды по склонам, концентрацию и движе-

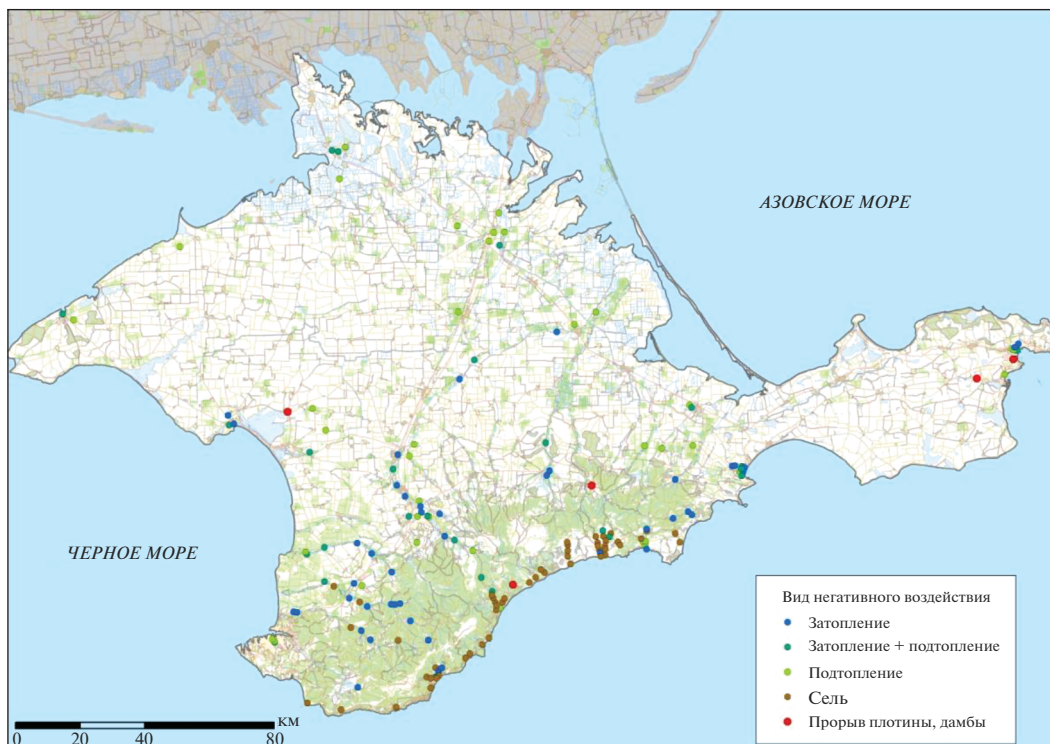


Рис. 1. Карта событий, связанных с негативным воздействием вод и селевых потоков, за период с 1815 г. по настоящее время (по материалам каталога).

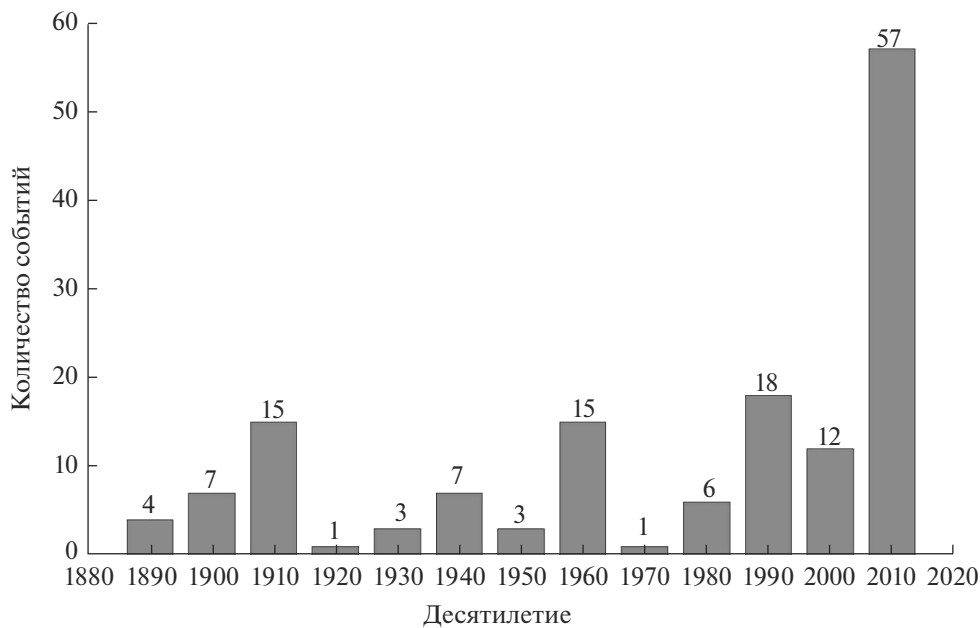


Рис. 2. Количество событий, связанных с негативным воздействием вод и селей, по десятилетиям.

ние воды в русле реки и др. [16]. В число характеристик водосбора, влияющих на формирование паводков, входят: площадь водосбора, средняя высота водосбора, рельеф и геологическое строе-

ние, почвенный и растительный покров, залесенность, закарстованность, а также антропогенные факторы (вырубка лесов, застройка берегов рек, создание водохранилищ и пр.). Подробно влия-

Таблица 1. Сравнение суточного слоя осадков в даты прохождения паводков с максимальным суточным слоем осадков за период наблюдений (н. в. — настоящее время)

Метеостанция (период наблюдений)	Суточный максимум осадков за весь период наблюдений, мм (дата) [2]	Суточные слои осадков в дни прохождения паводков в 2021 г., мм [32]		
		Июнь	Июль	Август
Керчь (1936—н. в.)	146 (06.06.1954)	87.4 (17.06.2021)	0.4	51 (12.08.2021) 63 (13.08.2021)
Ай-Петри (1895—н. в.)	215 (17.12.1962)	295 (18.06.2021)	85 (04.07.2021)	0.7
Ялта (1881—н. в.)	135 (17.07.1910)	134 (18.06.2021)	34 (04.07.2021)	0

ние всех перечисленных факторов рассмотрено в [17, 24, 25, 33, 40, 41].

Для образования селей, помимо перечисленных гидрометеорологических условий и рельефа, необходимое условие — наличие значительного количества обломочного материала, формирующегося на склонах в виде оползней, осыпей и обвалов, а также выносимого из оврагов и небольших притоков [16].

Безусловно, главный фактор формирования паводков в Крыму — метеорологический. Именно он запускает процесс формирования паводка. Локальные местные условия, особенности водосборов и русловой сети могут либо усилить, либо ослабить мощь этого паводка и его опасных последствий.

Летом 2021 г. над территорией Крыма трижды складывалась такая синоптическая обстановка, которая вызвала выпадение обильных интенсивных осадков. Оставляя за рамками статьи подробный разбор синоптической ситуации, приводим характерные суммы осадков на метеостанциях в сравнении с данными многолетних наблюдений (табл. 1). Данные приведены по метеостанциям, расположенным на водосборах рассматриваемых рек.

Дожди с наибольшим слоем выпавших осадков прошли в июне. По данным метеостанций Керчь, Ялта, Ай-Петри, суммы осадков, выпавших 17.06.2021 и 18.06.2021, были соизмеримы с предыдущими максимумами за весь период наблюдений или даже превысили их. В результате этих осадков сформировались крупные паводки на реках Керченского п-ова и на реках района Ялты. На отдельных притоках рек Дерекойка и Учан-Су прошли сели.

В июле и августе осадки также были обильные, но не столь выдающиеся и имели более локальный характер.

По данным Крымского УГМС на метеостанции Ай-Петри слой осадков 04.07.2021 был в 3 раза меньше, чем в 18.06.2021. Несмотря на то, что метеостанция расположена в 2 км от границы водосбора р. Бельбек, эти осадки можно считать косвенным индикатором паводка на Бельбеке. Для лучшего понимания метеоусловий, сформировавших паводок в бассейне Бельбека, данные по метеостанции Ай-Петри дополнены данными наблюдений за осадками 04.07.2021 на гидрологических постах (ГП): Аромат — 98.2, Многоречье — 113.5, Куйбышево — 44.5 мм. Осадки на верхних притоках Бельбека (ГП Многоречье) были больше, чем на Коккозке (ГП Аромат) и в среднем течении Бельбека (ГП Куйбышево).

В августе зафиксированы обильные осадки по метеостанции Керчь. В течение шести дней (с 11.08.2021 по 16.08.2021) выпало ~200 мм осадков, наибольшие суточные слои осадков наблюдались 12.08.2021 и 13.08.2021. В результате сформировался второй за лето мощный паводок на реках района Керчи.

Что касается условий подстилающей поверхности, то перечисленные выше факторы — геология и рельеф, растительность и почвы — относительно стабильные величины для водосборов, и их влияние на формирование максимального стока однородно во времени. Для выяснения причин уникальности летних паводков 2021 г. по сравнению с предшествующими в ходе полевых работ проведены обследования водосборов рассматриваемых рек. На основе собранного материала сформулирован перечень местных факторов, которые могли вызвать локальные усиления негативных проявлений именно для паводков 2021 г. Большинство приведенных ниже факторов не влияет на формирование самой волны паводка, но на отдельных участках создает такие условия ее прохождения, которые могут значимо повысить характерные расходы и уровни воды, а также спровоцировать различные негативные

проявления, развитие опасных процессов. В перечень местных факторов включены перечисленные ниже.

1. Состояние русел рек. Полевые обследования и опросы местных жителей показали, что русла многих рек до прохождения паводков были сильно захламлены, особенно в пределах территорий населенных пунктов. Отсутствие регулярных расчисток русел от растительности, древесных заломов, мусора и донных отложений сильно снизило их пропускную способность, спровоцировав тем самым увеличение уровней затопления. На реках района Ялты дополнительная причина стеснения русел – скопления селевого материала, принесенного сверху в предшествующие паводку периоды.

2. Состояние верхних звеньев эрозионной сети. Обследование овражно-балочной сети в верховьях рассматриваемых рек, а также предоставленные местными специалистами данные мониторинга за предпаводковый период показали, что многие малые эрозионные формы (МЭФ) накануне прохождения паводка были сильно захламлены обломочным материалом. Наличие в областях формирования стока обширных скоплений обломочного материала может при прохождении паводка сформировать селевой паводок или сель и тем самым усугубить негативные последствия из-за громадной разрушительной силы селевого потока. Кроме того, обследования МЭФ и склонов показали обилие древесного лома по территории водосборов, который при отсутствии регулярных чисток мог спровоцировать формирование в МЭФ локальных завалов и подпруд, которые при выпадении обильных осадков могли быть прорваны, что увеличило волну паводка.

3. Предпаводковое состояние водосбора и гидрогеологические условия. Высокая степень увлажненности водосбора и наполненность подземных водоносных горизонтов из-за дождей в предшествующий паводку период могли также способствовать более резкому отклику гидрологической системы на выпавшие осадки. Анализ метеоусловий рассматриваемых районов в предпаводковый период 2021 г. показал, что паводкам июня предшествовал достаточно сухой, почти бездождевой период, а паводкам июля и августа предшествовали месяцы с повышенным по сравнению со среднегодовыми величинами количеством осадков.

4. Уровень моря, помимо синоптической обстановки, – немаловажный гидрометеорологический фактор формирования повышенных уровней воды в приустьевых участках рек. Для Керчи с учетом рельефа территории и малой длины водотоков, а также того, что были затоплены паводком именно прибрежные морские территории, можно предположить, что уровень моря сыграл определенную роль в формировании уровней за-

топления. Анализ отметок уровня моря в Керченском проливе за летний период показал, что июньский паводок совпал по времени со сгоном; в августе, наоборот, паводок пришелся на период повышенного уровня моря (нагона), что могло создать подпор и увеличить уровни затопления.

5. Состояние водохозяйственной инфраструктуры. В ходе полевых работ было обследовано более 100 гидротехнических сооружений (ГТС) в бассейнах рассматриваемых рек. Обследование показало, что далеко не все водопропускные сооружения по своим геометрическим параметрам пригодны для пропуска паводков такого масштаба, во многих створах сооружения забиты обломочным материалом. Часть из них могла стать локальными препятствиями, тем самым создавая подпор и увеличивая уровни и площади затопления на вышележащих участках. С другой стороны, некоторые сооружения находятся в неудовлетворительном состоянии и не способны выдержать напор волны паводка. Так, неудовлетворительное состояние плотин нескольких прудов в бассейне Бельбека и плотины пруда на р. Булганак в Керчи стало причиной частичного размыва тела плотин, тем самым увеличив расход воды паводков. Кроме того, в населенных пунктах отсутствуют или находятся в неудовлетворительном состоянии дренажные системы, ливневая канализация, что также вызывает затопления при выпадении обильных осадков. Отсутствие сооружений инженерной защиты, в том числе берегоукрепительных сооружений, также в значительной степени усугубляет негативное воздействие вод при прохождении паводков.

В каждом рассматриваемом районе набор факторов и соотношение степеней их воздействия имеет свои индивидуальные черты.

По результатам проведенного анализа факторов формирования паводков и их негативных последствий можно сделать следующие выводы.

Паводкам на реках района Керчи и Ялты 17–18 июня предшествовали уникальные метеорологические условия – суточные слои осадков были соизмеримы с абсолютными максимумами за период наблюдений или даже превысили их. Метеорологический фактор здесь можно считать абсолютно доминирующим. Это, конечно, не исключает влияния других, локальных факторов, усугубивших экстремальность паводков.

Паводки, прошедшие в бассейне р. Бельбек в июле и на реках района Керчи в августе, были сформированы в результате выпадения большого, но все же не уникального количества осадков. В формировании этих паводков, помимо метеорологического, очень важную роль сыграли факторы местного характера: локальные особенности водосборов рек, малой эрозионной сети, русел рек,

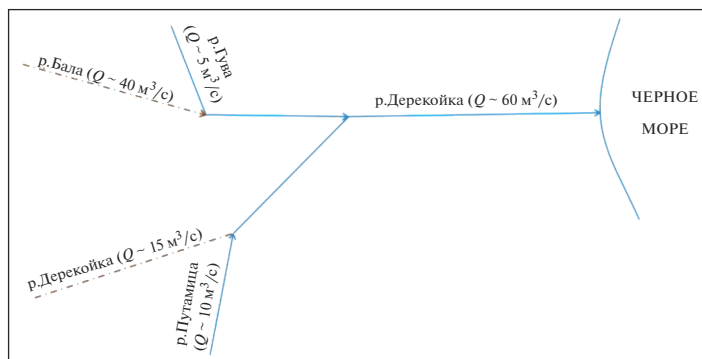


Рис. 3. Схема распространения паводка в бассейне р. Дерекойки 18.06.2021 (коричневый пунктир — селевой поток, голубая линия — водный поток).

ГТС, а в случае затопления Керчи — уровень моря.

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ И УРОВНЕЙ ВОДЫ ПАВОДКОВ 2021 г.

Для анализа процессов формирования и распространения паводочной волны в сентябре 2021 г. был проведен комплекс полевых топографо-геодезических и гидрометрических работ на заранее намеченных створах вдоль всех исследуемых водотоков. Всего работы проведены на 64 створах: 12 створов на реках района Керчи, 18 — на реках в районе Ялты, 34 — в бассейне р. Бельбек.

Работы на гидрометрических створах включали в себя съемку поперечного профиля долины до незатопляемых отметок, измерение продольного уклона водной поверхности, измерение текущего расхода воды, съемку абсолютных высот отметки текущего уреза воды и максимального уровня воды прошедшего паводка (по меткам высоких вод), фотографирование и описание русла и берегов реки.

Полученные в ходе полевых работ материалы использованы для расчета максимальных расходов воды прошедших паводков. Расходы воды, соответствующие зафиксированным отметкам уровней высоких вод, определены в расчетных гидрометрических створах по кривой $Q = f(H)$ с использованием ПО Profiles2010 [19]. Рассчитанные значения расходов являются оценочными из-за неопределенностей, возникающих в процессе расчета, а также из-за наличия ряда возможных источников ошибок в исходных данных.

Для большей надежности расчеты проведены на большом количестве створов, что дало возможность поверять результаты путем сравнения рассчитанных величин по соседним створам, анализировать возможные причины расхождения значений и отбрасывать недостоверные значения.

Для тех створов, на которых ведутся наблюдения на гидрологических постах, достоверность результатов проведенных расчетов проверялась сравнением расчетных значений с аналогичными величинами, предоставленными Крымским УГМС по запросу ИВП РАН.

На реках района Керчи экстремальные паводки сформировались за это лето дважды — 17–18 июня и 12–13 августа. Проводился единый расчет максимальных расходов воды по найденным меткам высоких вод. Максимальные расходы воды паводков 2021 г. на реках района Керчи оцениваются так: 60 м³/с на Мелек-Чесме, 60 м³/с на Катерлезе и 65 м³/с на Булганаке.

Результаты обследований на реках района Ялты показали, что на части водотоков в июне 2021 г. прошел сель, вызванный паводком. На рис. 3 приведена построенная по результатам расчетов схема прохождения паводка в бассейне р. Дерекойки 18.06.2021 с указанием типа потока (водный/селевой). По рекам Бале и Дерекойке прошли мощные сели. Большая часть принесенного селевого материала полностью задержалась на территории микрорайона Васильевка, а до города дошел уже не сель, а паводок.

В бассейне р. Учан-Су прошедший паводок также имел смешанные черты. Паводок сформировался на трех основных водотоках — собственно Учан-Су, ее правом притоке Барбале и левом притоке Яузларе. Результаты обследований показали, что на первых двух прошел водный паводок, на Яузларе — сель. К городу поток подошел уже в едином русле и, скорее всего, имел черты селевого паводка. Максимальный расход воды в р. Учан-Су после соединения с притоками оценивается в 50–55 м³/с. Расчеты на нижних створах показали, что к устью реки расход воды еще несколько увеличился за счет бокового притока и составил 70–75 м³/с.

Сравнение рассчитанных максимальных расходов воды паводков на реках Дерекойке и Учан-

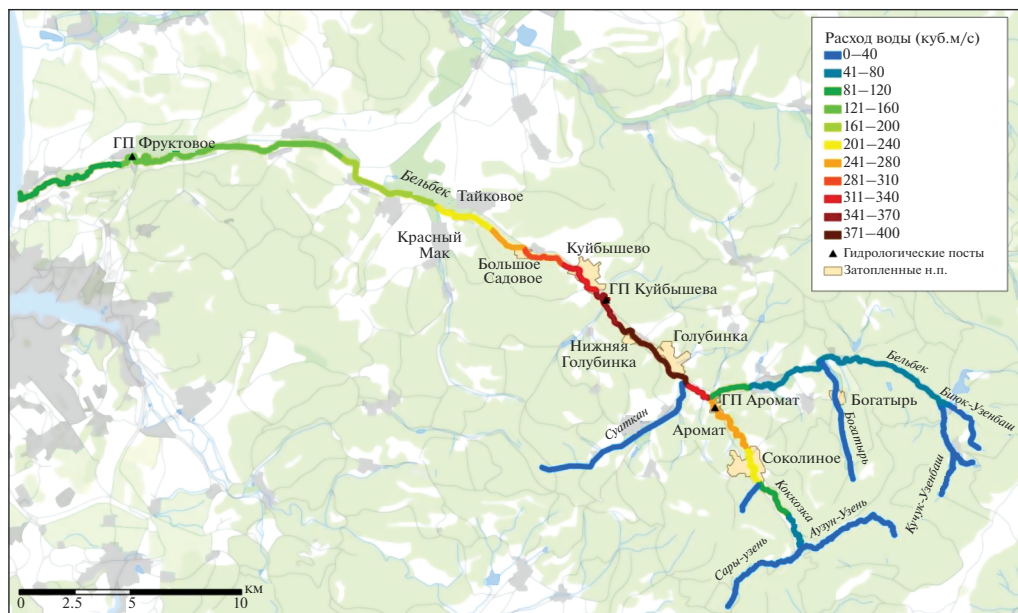


Рис. 4. Процесс трансформации волны паводка в бассейне р. Бельбек – максимальные расходы воды на пике паводка 4–5 июля 2021 г.

Су с аналогичными величинами, предоставленными Крымским УГМС, показало некоторое завышение рассчитанных расходов по отношению к данным УГМС. Расход воды Дерекойки в створе ГП г. Ялта по данным УГМС составил $48 \text{ м}^3/\text{с}$, по расчетам $\sim 60 \text{ м}^3/\text{с}$, расход воды Учан-Су в створе ГП г. Ялта по данным УГМС – $43 \text{ м}^3/\text{с}$, по расчетам – $50\text{--}55 \text{ м}^3/\text{с}$. Учитывая сложность объекта и все неопределенности расчета, имеющиеся расхождения представляются допустимыми.

Для бассейна р. Бельбек рассчитанные значения максимальных расходов воды в створах гидрологических постов также несколько выше, чем значения максимальных расходов в этих же створах по данным УГМС. Так, на ГП р. Коккозка – с. Аромат максимальный расход по данным поста составляет $219 \text{ м}^3/\text{с}$, по результатам расчета данного исследования – $240 \text{ м}^3/\text{с}$, на ГП р. Бельбек – пгт Куйбышево – 329 и $360 \text{ м}^3/\text{с}$, на ГП р. Бельбек – с. Фруктовое – 114 и $125 \text{ м}^3/\text{с}$. Удовлетворительные результаты сравнения позволяют с доверием относиться и к результатам расчетов расходов во всех других створах.

На основе полученных значений максимальных расходов воды на 34 створах на р. Бельбек и ее притоках проведен анализ распространения паводка. Графически этот процесс отображен на рис. 4 и 5.

Анализ результатов позволил выделить несколько створов, значения расходов по которым выбиваются из общей тенденции (рис. 5), а потому вызывают сомнения. При дальнейшем анали-

зе величины расходов по этим створам не учитывались.

Зафиксирована последовательная трансформация максимальных расходов воды по длине реки. Основная волна паводка сформировалась в бассейне левого притока р. Бельбек – р. Коккозка. На Коккозке паводок был сформирован не только по ее двум основным притокам – рекам Сары-Узень и Аузун-Узень, но также и за счет мощного бокового притока по балкам и оврагам. В месте слияния Сары-Узень и Аузун-Узень максимальный расход воды Коккозки оценивается в $\sim 80 \text{ м}^3/\text{с}$. Ниже по течению после приема воды ряда притоков (в том числе селевых) расход постепенно увеличивается и к устью достигает $\sim 240 \text{ м}^3/\text{с}$.

На Бельбеке выше впадения Коккозки расход воды был в несколько раз меньше, чем в Коккозке. По оценкам данного исследования, в верхнем течении р. Бельбек после соединения рек Кучук-Узенбаш, Бюк-Узенбаш и Маноготры расход воды составлял $40\text{--}50 \text{ м}^3/\text{с}$. Далее вниз по течению расход постепенно увеличивался за счет бокового притока и к месту впадения Коккозки составлял $\sim 90 \text{ м}^3/\text{с}$.

После впадения в Бельбек притоков Коккозки и Суаткана расход воды в Бельбеке достиг своего максимума – $380\text{--}390 \text{ м}^3/\text{с}$.

На участке р. Бельбек от с. Голубинка до пгт Куйбышево расход воды меняется не сильно – уменьшается с 390 до $350 \text{ м}^3/\text{с}$. Ниже Куйбышево начинается значительное уменьшение расхода воды. На отрезке между Куйбышево и дорогой,

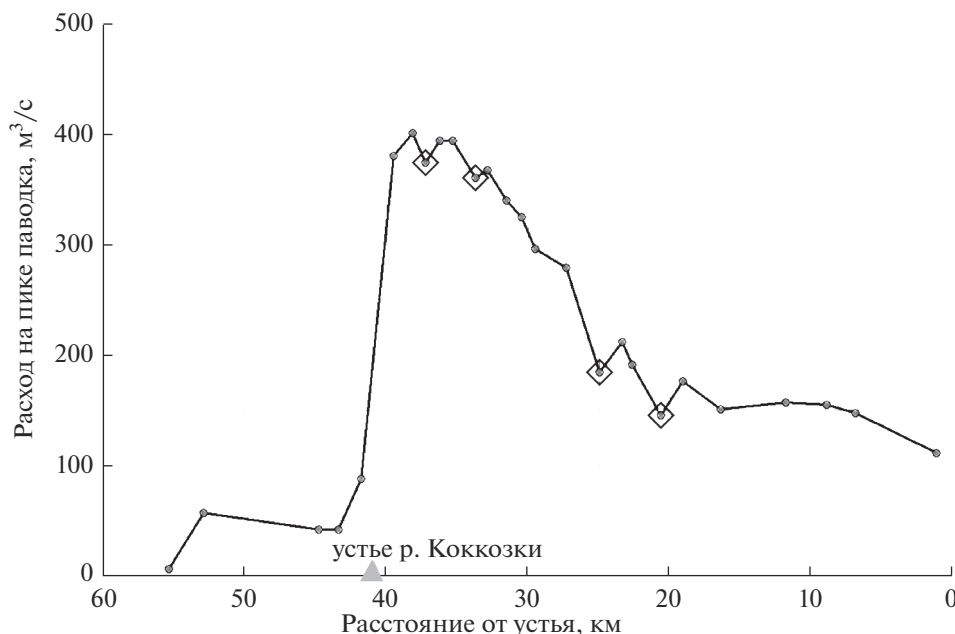


Рис. 5. Продольное распределение максимальных расходов воды паводка на р. Бельбек (ромбами выделены створы, результаты расчета по которым выбиваются из общей тенденции).

соединяющей села Танковое и Красный Мак, расход воды в Бельбеке понижается с 350 до 200 м³/с.

Обследование реки показало, что, действительно, на этом участке значительная часть паводка ушла на правый берег. Левый берег реки на этом участке скальный, очень высокий и крутой, а правый берег — широкая плоская равнина, занятая сельхозугодиями, преимущественно фруктовыми садами. Русло реки глубокое, имеет большую пропускную способность. Оно отделено от территории садов искусственным валом, однако этот вал не везде имеет достаточную высоту, чтобы удержать паводочную волну в русле. На тех участках, где в вале имеются понижения или прораны, во время прохождения пика паводка вода протекала через них, растекаясь по обширным пространствам на правом берегу, что подтверждается зафиксированными метками высоких вод.

Плоскостной поток по правому берегу дошел до дороги, соединяющей села Танковое и Красный Мак, насыпь которой сработала дамбой и задержала его дальнейшее продвижение (рис. 6). Так был срезан пик паводка на этом участке.

Ниже по течению продолжался процесс распластывания паводка, максимальный расход снижался по длине реки, но уже менее интенсивно. Если на 7-километровом участке между пгт Куйбышево и с. Танковым расход снизился с 350 до 200 м³/с, то на нижележащем 20-километровом участке от с. Танкового до устья он уменьшился с 200 до 110 м³/с.

ОЦЕНКА ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ ПАВОДКОВ 2021 г.

Для оценки экстремальности прошедших паводков проведено сравнение максимальных расходов и уровней воды в 2021 г. с максимальными расходами и уровнями воды на исследуемых реках за предшествующий период. В качестве информации использованы данные наблюдений на ГП Крымского УГМС [1, 8, 9, 33–35] и материалы публикаций [7, 12, 16, 24–26, 31]. Для анализа использовались ряды максимальных годовых расходов воды, а также отдельно ряды максимальных расходов воды паводков теплого периода, так как различный генезис паводков холодного и теплого периодов в Крыму требует отдельного статистического анализа расходов этих паводков [24, 25, 33].

На реках района Керчи в настоящее время гидрологических постов нет, данные наблюдений отсутствуют. В работе [31] приведены расчетные значения 1%-го расхода воды для рек Мелек-Чесме, Катерлез и Булганак, посчитанные авторами статьи по формуле предельной интенсивности стока. Сравнение данных статьи и рассчитанных расходов в 2021 г. приведено в табл. 2.

Сопоставление максимальных расходов воды на реках Учан-Су и Дерекойке в створе гидрологических постов в Ялте во время паводка в 2021 г. с данными наблюдений за предшествующий период приведено в табл. 3. Расход воды на р. Учан-Су превысил предыдущий наблюдаемый максимум на 30%. На р. Дерекойке расход воды на 16% превысил предыдущий наблюдаемый годовой



Рис. 6. Река Бельбек и ее правый берег во время прохождения паводка 04.07.2021 г.

максимум и на 110% – максимум теплого периода.

Сопоставление наблюденных летом 2021 г. расходов воды с расчетными величинами максимального расхода воды редкой повторяемости, согласно [16], показывает, что расход воды на обеих реках в июне 2021 г. был соизмерим с расходом 1%-й обеспеченности или превысил его.

Для сопоставления максимальных расходов воды паводков в бассейне р. Бельбек за 2021 г. и за предшествующий период проведен статистический анализ рядов максимальных расходов воды за период наблюдений до 2019 г. По данным наблюдений на ГП Аромат, Куйбышево и Фруктовое проведен статистический анализ рядов: проверка рядов на однородность и стационарность, оценка статистических параметров, построение аналитических кривых обеспеченности, расчет значений квантилей 0.1- и 1%-й обеспеченности. Гидрологические расчеты проведены в соответствии с действующими нормативными документами [23, 37]. Эмпирические кривые обеспеченности максимальных расходов воды на реках Крыма, как правило, имеют повышенную асимметричность, поэтому для их сглаживания и экстраполяции рекомендуется логарифмически нормальная кривая распределения [16, 33]. Сравнение полученных значений квантилей 0.1%-й и 1%-й обеспеченности с аналогичными оценками в [16, 33] показало высокую сходимость результатов.

В табл. 4 приведено сравнение максимальных расходов воды в 2021 г. с предыдущими наблюденными максимумами расходов, а также с максимальными расходами воды 0.1%-й и 1%-й обеспеченности, рассчитанными по данным за предшествующий период наблюдений (до 2019 г.). Приведенные результаты показывают разную

значимость прошедшего в 2021 г. паводка в разных частях бассейна.

Для ГП Аромат паводок 2021 г. – совершенно уникальный. Максимальный уровень воды в 2021 г. на пике паводка превысил предыдущий максимум на 1 м. Уникальность паводка наглядно демонстрирует приведенный на рис. 7 график максимальных расходов воды за период наблюдений. Расход воды превысил предыдущий максимум в 3 раза и в >10 раз превысил среднемноголетнее значение этой характеристики. Также прошедший расход воды был выше имеющихся оценок максимальных расходов воды 0.1%-й и 1%-й обеспеченности, рассчитанных по данным за предыдущий период наблюдений; т. е. наблюденный в 2021 г. расход воды в рамках предшествующих оценок максимального стока имеет повторяемость реже, чем раз в 1000 лет, что, безусловно, указывает на необходимость пересмотра и уточнения статистических параметров максимального стока с учетом данных наблюдений 2021 г.

На ГП Куйбышево расход воды паводка превысил предыдущий максимум в 1.5 раза, предыдущий максимум уровня был превышен на 44 см. Если сравнивать наблюденный расход воды со значениями квантилей различной обеспеченно-

Таблица 2. Сравнение максимальных расходов воды Q паводков 2021 г. с максимальными расходами воды 1%-й обеспеченности по [31] для рек района Керчи

Река	$Q_{1\%}$ по [31], м ³ /с	Q_{\max} 2021 г., м ³ /с
Мелек-Чесме	57.18	60.0
Катерлез	59.45	60.0
Булганак	29.97	65.0

Таблица 3. Сравнение максимальных расходов воды паводка 2021 г. с данными наблюдений на ГП на реках района Ялты ($\text{м}^3/\text{с}$)

Гидрологический пост	Расход воды на пике паводка 18.06.2021	Предыдущий максимальный расход (дата)		Расчетные значения максимальных расходов воды редкой повторяемости по [16]	
		год	теплый период	1%	0.1%
ГП р. Учан-Су – г. Ялта	43.0	33.1 (10.01.1967)	н.д.	44.9	101
ГП р. Дерекойка – г. Ялта	48.1	41.3 (17.12.1962)	22.8 (10.06.1949)	43.5	98.0

Таблица 4. Сравнение максимальных расходов воды паводка 2021 г. с данными наблюдений на ГП в бассейне р. Бельбек ($\text{м}^3/\text{с}$)

Гидрологический пост	Расход воды на пике паводка 4–5 июля 2021 г.	Предыдущий максимальный расход (дата)		Расчетные значения максимальных расходов воды редкой повторяемости (по данным наблюдений до 2019 г.)	
		год	теплый период	1%	0.1%
ГП р. Коккозка – Аромат	219	78.2 (14.12.1981)	68.3 (17.10.1981)	106	195
ГП р. Бельбек – Куйбышево	329	295 (14.12.1981)	218 (21.06.1941)	250	482
ГП р. Бельбек – Фруктовое	113	414 (14.12.1981)	137 (27.04.1969)	148	414

сти, оцененными по данным за предшествующий период, то его величина соответствует квантилю 0.4%-й обеспеченности (расходу, проходящему 1 раз в 250 лет). Паводок был уникальным, но попал в диапазон расходов воды редкой повторяемости. Учет наблюденного в 2021 г. расхода в оценке статистических параметров максимального стока так же, как и для ГП Аромат, в дальнейшем значительно скорректирует величины квантилей редкой повторяемости.

На ГП Фруктовое паводок был высокий, но не уникальный, предыдущие максимумы уровней и расходов воды не были превышены. Расход воды паводка соответствует величине квантиля 4.6%-й обеспеченности (по оценкам за предыдущий период наблюдений).

Сравнение июльского паводка с шестью предыдущими самыми крупными паводками на Бельбеке (1941, 1962, 1969, 1981, 1983, 1987 гг.) показало, что среди прочих паводок 2021 г. выделяется уникальным значением отношения срочного максимального расхода к среднесуточному максимальному расходу. Это соотношение, отражающее дружность прохождения паводка, ранее

оставалось относительно стабильным и составляло от 1.5 до 2.5 для предыдущих крупных паводков. В 2021 г. оно достигло 5.1 для ГП Аромат и 6.0 для ГП Куйбышево. Это выделяет паводок 2021 г. из общего ряда и, по всей видимости, может служить подтверждением сделанного предположения, что паводок имел отчасти черты волны прорыва. Это предположение подтверждают и опросы местных жителей, показавшие, что повсеместно отмечалось крайне непродолжительное стояние максимальных уровней во время паводка (от 20 мин до 1 ч). Так как крупных прудов в бассейне Коккозки нет, то принято, что на Коккозке имел место прорыв естественно сформированной запруды (скорее всего завал из деревьев) на одном из верхних звеньев эрозионной сети. Поскольку прорыв произошел после выпадения большого количества осадков, то волна прорыва на одном из притоков наложилась на волны паводков, проходящих одновременно на остальных притоках, что и сформировало уникальный расход воды в р. Коккозке.

Приведенные материалы демонстрируют уникальность паводка 2021 г. и ставят вопрос о необ-

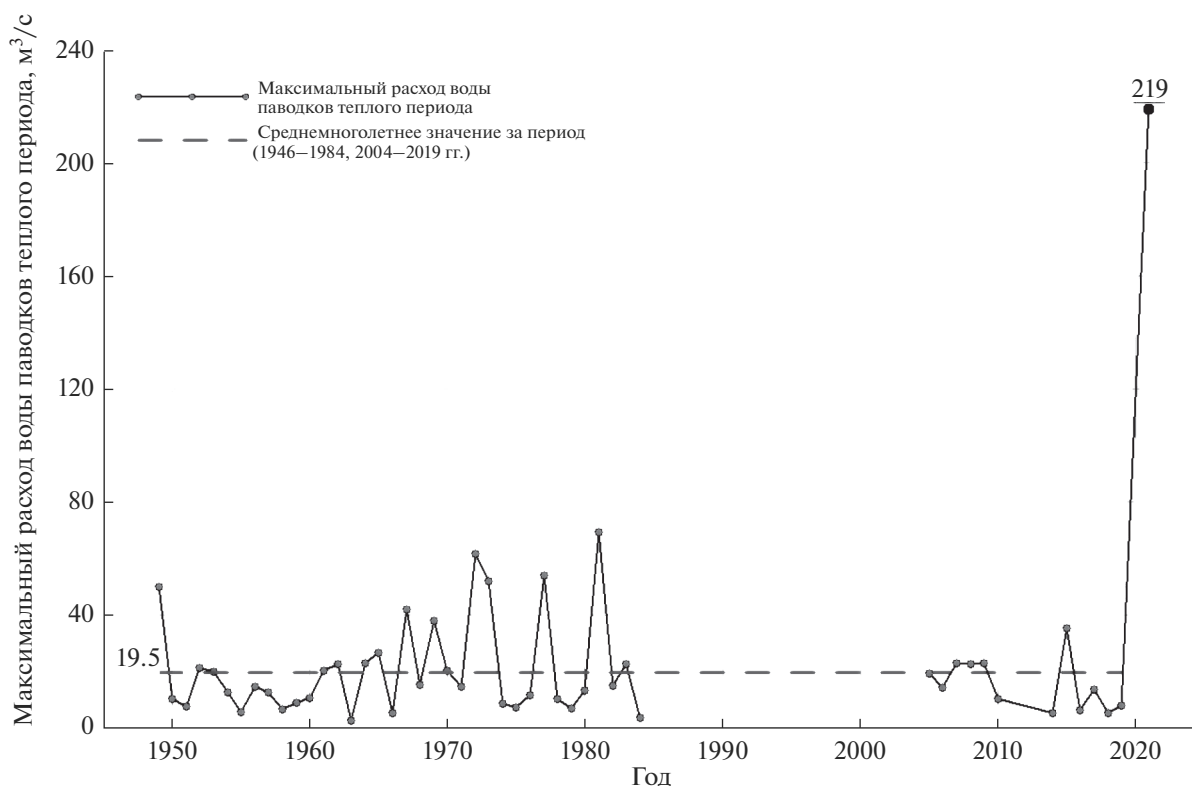


Рис. 7. Максимальный расход воды паводков теплого периода по ГП р. Коккозка – с. Аромат за период наблюдений (1949–1984, 2005–2021 г.).

ходимости корректировки статистических оценок максимального стока в бассейне р. Бельбек с учетом вновь полученных данных. Несмотря на различную значимость прошедшего паводка для разных частей бассейна, представляется очевидным, что для всех ГП наблюдаемый летом 2021 г. расход воды в той или иной степени повлияет на имеющиеся представления о максимальном стоке, сформированные на основе данных наблюдений за предшествующий период. В связи с особым генезисом паводка 2021 г. остается открытым вопрос о том, как следует учитывать наблюдаемые в 2021 г. расходы воды в ряду максимальных расходов. Этот вопрос может стать темой отдельного научного исследования.

НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПАВОДКОВ 2021 г.

Для оценки опасных проявлений эрозионных и русловых процессов, спровоцированных паводком, а также негативного воздействия вод и селевых потоков в ходе выполнения полевых работ проведено обследование рек и прибрежных территорий в населенных пунктах. Масштабы негативного воздействия в городах Керчи и Ялте и в населенных пунктах на территории бассейна р. Бельбек представлены на рис. 8. Приведенные

карты демонстрируют повсеместную активизацию опасных эрозионных и русловых процессов с серьезными негативными последствиями. Основные виды выявленного негативного воздействия следующие:

- затопление территорий сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов: жилых кварталов, промышленных объектов, объектов транспортной и инженерной инфраструктуры, объектов рекреации, административных, образовательных, медицинских учреждений;

- причинение ущерба движимому и недвижимому имуществу населения: несколько смытых домов, десятки разрушенных заборов, смытых хозяйственных построек, унесенных потоком машин;

- нарушение путей сообщения между населенными пунктами, временный выход из строя систем инженерных коммуникаций;

- захламливание территорий населенных пунктов обломочным материалом, древесным и бытовым мусором, принесенным паводком или селем;

- частичное или полное нарушение пропускной способности русел вследствие завала их обломочным материалом или древесным мусором, принесенным паводком или селем;

- полное или частичное разрушение ГТС, в том числе плотин прудов и мостов из-за активизации

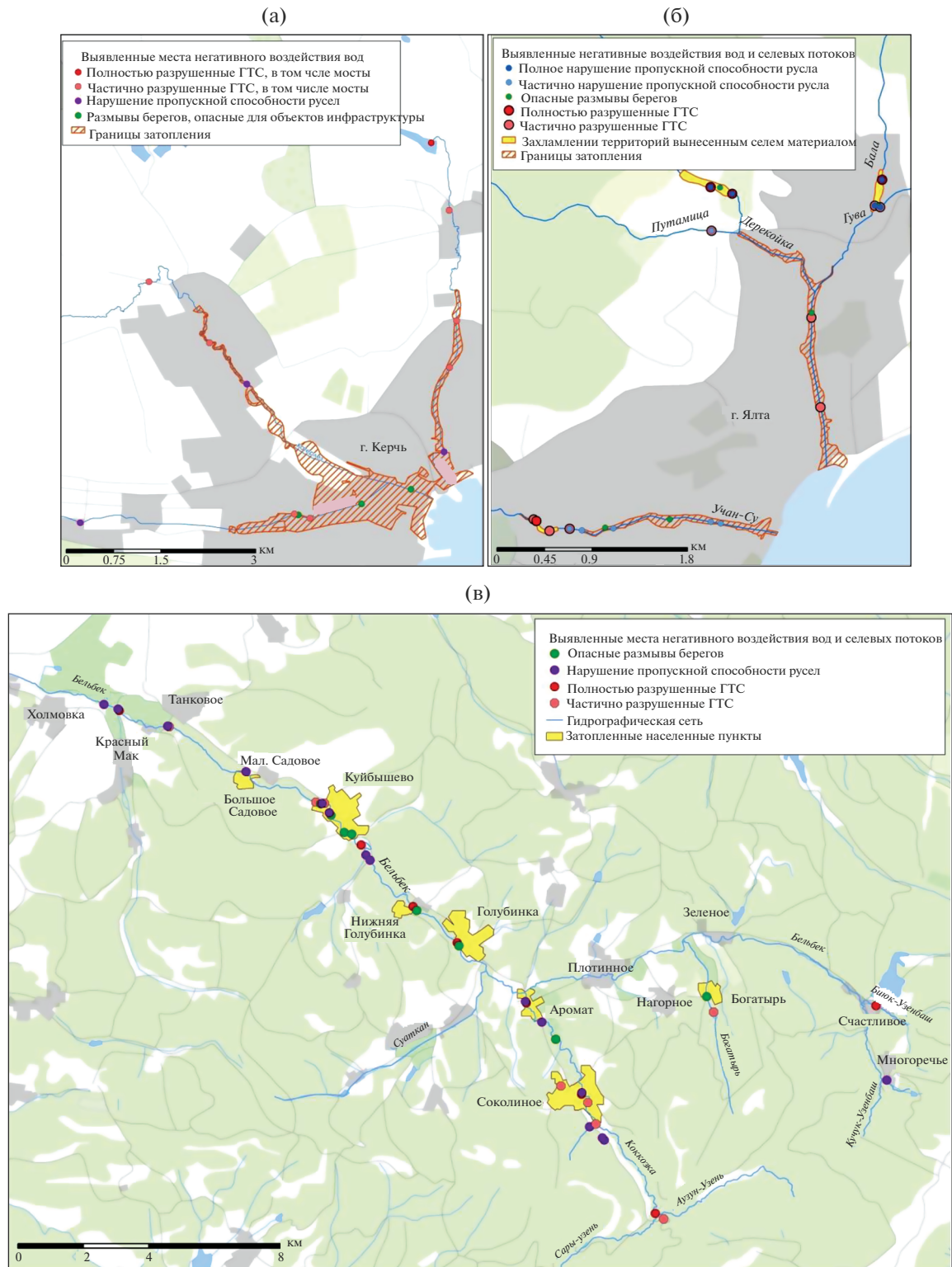


Рис. 8. Выявленные места негативного воздействия вод и селевых потоков: а – г. Керчь; б – г. Ялта; в – бассейн р. Бельбек.

эрозионной деятельности и разрушительной силы паводочной волны;

размыты берегов рек, представляющие опасность для объектов инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование условий формирования, особенностей прохождения и последствий экстремальных гидрологических явлений на реках Крыма летом 2021 г.

Анализ причин формирования паводков показал, что они произошли в результате совокупного действия различных факторов, главный из которых — метеорологический. Местные условия в некоторых случаях в значительной степени усугубили влияние метеорологического фактора.

Результаты исследования показали уникальность прошедших паводков по всем исследуемым объектам. Общее для всех объектов — превышение в ходе паводков 2021 г. предыдущих зафиксированных максимумов расходов воды, а также обилие и разнообразие негативных последствий для населения и объектов инфраструктуры. Показано, что зафиксированные в 2021 г. величины расходов и уровней могут существенным образом повлиять на расчетные значения этих величин редкой повторяемости.

Прошедшие паводки вызвали опасные эрозионные процессы и имели ряд существенных негативных последствий. Для предотвращения аналогичных явлений и/или минимизации их негативных последствий в будущем предлагается действовать в двух направлениях:

изучать и прогнозировать те природные факторы, на которые невозможно повлиять;

осуществлять превентивные меры непосредственно на реках и их водосборах для минимизации последствий паводков.

Представляется крайне важным изучение и прогнозирование метеорологических факторов формирования экстремальных явлений. Аномальность метеоусловий, приведших к формированию паводков летом 2021 г., может быть сигналом увеличения нестабильности климата. Поэтому следует обратить пристальное внимание на влияние изменений климата на экстремальные гидрологические явления в Крыму.

Все более важное значение в решении этих вопросов приобретают методы моделирования, совмещения моделей циркуляции атмосферы с моделями формирования стока и гидродинамическими моделями [14, 15, 42]. Создание подобных региональных моделей для водных объектов Крыма может стать необходимым инструментом краткосрочного прогнозирования экстремальных гидрологических явлений и оценки рисков наводнений в условиях меняющегося климата.

Не менее значима задача предотвращения негативных последствий “на местах” — на самих реках и на их водосборах. Подготовка и проведение ряда превентивных мер, позволяющих при формировании экстремальных гидрологических яв-

лений избегать серьезных негативных последствий, — важный шаг на пути к повышению водной безопасности Крыма в будущем.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Охременко (Крымское УГМС) за ценные советы в планировании полевых работ и помощь в оценке причин и последствий прошедших экстремальных явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 18.09.2021)
2. Архив ежедневных данных по осадкам KNMI Climate Explorer. <http://climexp.knmi.nl/start.cgi> (дата обращения 29.10.2021)
3. *Багров Н.В., Вахрушев Б.А.* К вопросу об активизации неблагоприятных природных процессов в Крыму в начале XXI века // Изменения состояния окружающей среды в странах содружества в условиях текущего изменения климата. М.: Медиа-Пресс, 2008. 232 с.
4. *Багрова Л.А., Смирнов В.О., Гунькина И.Ю., Змерзлая К.С.* Опасные природные явления в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2013. Т. 9. Вып. 2. Ч. 1. С. 115–126.
5. *Величко Б.Л.* Селевые потоки и мероприятия по борьбе с ними в Крыму. Автореф. дис. ... канд. сел.-хоз. наук. Харьков: Харьковский сельскохозяйственный ин-т, 1964. 24 с.
6. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2003. 352 с.
7. *Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Тодорова Е.И.* Максимальный сток дождевых паводков рек Горного Крыма // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2014. Вип. 17. С. 133–140.
8. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. II. Украинская ССР. Вып. 3. Бассейн Северского Донца, рек Крыма и Приазовья. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
9. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики (за 1971–1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеоиздат, 1980.
10. *Данилов А.Н.* Риски чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Республики Крым // XX Международн. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций “Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий”. Тез. докл. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. С. 201–205.
11. Ежегодные доклады Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым “О состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым” за 2013–2020 гг.

12. *Ескин В.М., Кузьминых А.Ю.* Сток рек Крыма // Вестник молодых ученых ПГНИУ. Сб. науч. тр. / Под ред. *Р.Р. Гильмутдинова*. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2016. Вып. 6. С. 12–17.
13. *Жук В.О.* Методика оценки потенциальной гидрометеорологической опасности территории Крымского полуострова. Дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж: Таврическая акад. КФУ, 2021.
14. *Иванов В.А., Овчаренко И.А., Прусов А.В., Шокуров М.В.* Моделирование катастрофических паводков в регионе Южного берега Крыма // Докл. Нац. акад. наук Украины. 2012. № 8. С. 79–84.
15. *Иванов В.А., Краевский К.Е., Лемешко Е.М., Прусов А.В., Шокуров М.В.* Реконструкция события экстремального паводка в регионе Южного Берега Крыма // Процессы в геосредах. 2017. № 2 (11). С. 503–510.
16. Климат и опасные гидрометеорологические явления в Крыму / Под ред. *К.Т. Логвинова, М.Б. Барабаш*. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 318 с.
17. *Клюкин А.А.* Экзогеодинамика Крыма. Симферополь: Таврия, 2007. 320 с.
18. *Клюкин А.А.* Экстремальные проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов в XX веке в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 1. С. 27–38.
19. *Кокорев А.В.* Программа выполнения расчетов по данным промеров и геодезической съемки морфопрофилей русла реки и затопляемой части речной долины Profiles 2010. Руководство пользователя. Валдай, 2010.
20. *Верескун А.В., Файзулин Т.Ш., Олтян И.Ю.* Крым. Комплексное исследование влияния рисков природных и техногенных чрезвычайных ситуаций на безопасность жизнедеятельности населения Республики Крым и г. Севастополя. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.
21. *Куксина Л.В., Голосов В.Н., Жданова Е.Ю., Цыпленков А.С.* Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в горном Крыму // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2021. № 5. С. 36–50.
22. *Лущик А.В., Горбатюк Н.В., Лущик М.А.* Сели Крыма. Исследования и селезащита // Гидротехника. 2016. № 3. С. 68–71.
23. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным / Под ред. *Рождественского А.В., Лобановой А.Г.* СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
24. *Мырза Е.Л., Овчарук В.А.* Анализ условий формирования паводков холодного периода на реках Крымских гор // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 740–745.
25. *Овчарук В.А., Прокофьев О.М., Тодорова О.И.* Особенности формирования паводков теплого периода на реках Горного Крыма // Вестн. Харьковского ун-та. № 1157. Сер. Геология. География. Экология. 2015. Вып. 4. С. 99–106.
26. *Овчарук В.А., Тодорова Е.И.* Статистические параметры максимальных расходов воды и слоев паводочного стока для рек горного Крыма // Геополитика и экогеодинамика региона. Симферополь: КНЦ, 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 766–770.
27. *Олиферов А.Н.* О селевых паводках в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 2. С. 67–72.
28. *Олиферов А.Н.* Селевые потоки в Крыму в XXI веке // Геополитика и экогеодинамика региона. Симферополь: КНЦ, 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 299–303.
29. *Олиферов А.Н.* Селевые явления в Крыму как чрезвычайные экологические ситуации // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 1. С. 39–46.
30. *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
31. *Рабешко С.М., Ступаченко Ю.В.* Гидрологическое обоснование необходимости защиты г. Керчь от паводков // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. тр. Симферополь: Нац. акад. природоохран. курорт. стр-ва, 2007. Вып. 18. С. 195–198.
32. Расписание погоды. <https://gp5.ru> (дата обращения: 26.10.2021)
33. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 344 с.
34. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
35. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1964.
36. *Самохина О.Ф., Кононова Н.К.* Роль циркуляции атмосферы в повторяемости наводнений в России в 2012–2018 гг. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск: ИГУ, 2019. С. 341–349.
37. СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик.
38. Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века / Под ред. *В.А. Бокова*. Симферополь: ДОЛЯ, 2010. 304 с.
39. Трансформация структуры водного баланса в Крыму в XX веке – начале XXI века и ее оптимизация / Под ред. *В.А. Бокова*. Симферополь: Крымский НЦ, 2011. 227 с.
40. *Турега О.Н.* Геологическое строение приустьевой части долины речки Мелек-Чесме // Культура народов Причерноморья. 2003. № 46. С. 30–32.
41. *Устойчивый Крым.* Водные ресурсы. Симферополь: Таврида, 2003. 413 с.
42. *Blöschl G., Kiss A., Viglione A. et al.* Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years // Nature 583. 2020. P. 560–566 <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>
43. *Glaser R., Riemann D., Schönbein J., Barriendos M., Brazdil R., Bertolin C., Camuffo D., Deutsch M., Dobrovolný P., van Engelen A.* The variability of European floods since AD1500 // Climatic Change. 2010. V. 101. P. 235–256. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9816-7>