

УДК 551.466.78  
DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-1-81-88

## ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РУСЛА РЕКИ АДАГУМ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

© 2018 г. И.В. Шeverдяев<sup>1</sup>

**Аннотация.** Среди основных причин, обусловивших большой материальный ущерб и человеческие жертвы во время паводка 6–7 июля 2012 г. в Краснодарском крае, выделяются закупоривание мостовых проемов мусором, снижающее их способность пропускать паводковые воды, и особенности морфологии русла реки и долины, способствующие затоплению городской застройки. После 2012 года проводится инженерное преобразование русла р. Адагум, призванное снизить паводковую опасность и не допустить затопления застроенных площадей Крымска при прохождении паводка 1 % обеспеченности. На основании естественной (по состоянию на 2012 г.) и преобразованной топографии русла согласно проектной документации противопаводковых работ проведено гидрологическое моделирование прохождения паводка 6–7 июля 2012 г. в условиях различной пропускной способности мостов. Построены цифровые модели поверхности естественного и преобразованного русла. В гидрологической модели учтено влияние трех мостов Крымска и его окрестностей – железнодорожный мост, автомобильный мост по ул. Новороссийской и автомобильный мост по улицам Синева и Маршала Гречко. Проведено моделирование паводка 2012 г. по трем сценариям. Первый сценарий предусматривает свободное прохождение паводковых вод в проемах мостов, второй – ситуацию, при которой проемы мостов не пропускают воду, третий – переменную пропускную способность мостовых проемов. Приведено сравнение зон затопления, времени наступления затопления и распределение максимальных скоростей течения. Результаты расчетов показывают, что преобразование русла эффективно снижает паводковую опасность только в труднодостижимых условиях незамусоренных мостов и речной долины. В противном случае снижение паводковой опасности носит локальный характер.

**Ключевые слова:** дождевые паводки, противопаводковые преобразования русла, цифровые модели местности, гидрологическое моделирование, зоны затопления.

## ENGINEERING CHANNEL TRANSFORMATIONS OF THE RIVER ADAGUM AND EVALUATION OF ITS IMPACT ON THE EXTREME RAINFALL FLOOD

I.V. Sheverdyayev<sup>1</sup>

**Abstract.** Among the main reasons for the great material damage and the number of human casualties during the flood on July 6-7, 2012 in Krasnodar Region, blockage of bridge apertures by debris, which decreases flow capacity and features of riverbed and valley morphology that contribute to the flooding of urban buildings are highlighted. After 2012, channel transformation of the river Adagum is carried out to decrease flood riskiness and disallow flooding of the Krymsk urban development by high waters of 1-percent probability. Based on the use of data on the natural topography of the channel and the design documentation of the flood protection work, a hydrological simulation of the flooding on July 6-7, 2012 was carried out under different bridge capacity. Digital terrain models of the natural and transformed channel surfaces were developed. The used hydrological model considered the influence of 3 bridges in Krymsk city-area – railway bridge, road bridge of Novorossiyskaya street, and road bridge of Sinev and Marshal Grechko streets. The modeling was conducted by 3 scenarios. The first of it provides free passing of flood waters through the bridge culverts. In the second scenario the bridge culverts are closed for flood water. In the third scenario flow capacity of the bridge culverts

<sup>1</sup> Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: ig71089@yandex.ru

is variable (free at first, blocked next and then free again). The article compares the flooding areas, the time of the flooding onset and the distribution of maximum flow velocities under different scenarios. The results show that channel transformation effectively reduces flood hazard only in conditions of uncluttered bridges and river valleys, which is difficult to reach. Otherwise, the reduction of the flood hazard is of a local nature.

**Keywords:** rainfall flood, channel transformation, digital terrain model, hydrologic modeling, flood area, flow velocity, clogged bridge.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия на реках Северо-Западного Кавказа (черноморском побережье и левых притоках Кубани) дождевые паводки приводят к большому материальному ущербу, а нередко и к человеческим жертвам. Наибольший общественный резонанс произвел паводок 6–7 июля 2012 г. Тогда осадки выпали на обширной территории от Новороссийска до Геленджика, в Крымском и Абинском районах Краснодарского края и сформировали высокие краткосрочные паводки на реках Цемес, Яшамба, Адагум, Абин, Адегой, Адерба. В результате прохождения паводка, по официальным данным, в Крымске погибло 148 человек [1]. Наибольшее количество жертв отмечено в г. Крымске и в станице Нижнебаканской [1].

Были опубликованы разные точки зрения на причины большого количества погибших. Отмечалось [2], что главной причиной стали многочасовые интенсивные осадки на водосборах рек, которые привели к кратковременному прохождению больших объемов воды, быстро заполнивших русло, пойму и надпойменную террасу в ночные часы, обусловили стремительный и высокий скачок или скачки уровня воды в реках. В работе [3] выделена особая роль проемов под капитальными мостами в Крымске (один железнодорожный мост и три автомобильных): бытовой и пойменный мусор создал пробки под мостами, это привело к подпору, затопившему пойму и надпойменную террасу. Другая точка зрения [4] на влияние мостовых переходов на прохождение паводка состоит в том, что количество этих сооружений в бассейне Адагума не позволяет выделить особую роль только основных мостов, были полностью разрушены или повреждены семь мостовых переходов (автомобильных и пешеходных). При этом проемы мостов представляли собой «решето» из стволов и веток деревьев, бытового мусора, однако водный поток не преграждался полностью. Поэтому резкий подъем уровня воды был обусловлен

не замусоренностью проемов одного-двух мостов, а, скорее, суммарным влиянием многих мостов на сток и интенсивностью стокоформирующих процессов.

После прохождения паводка 6–7 июля 2012 г. в бассейне р. Адагум проводилась очистка долин рек от паводкового мусора. В 2014 г. начаты мероприятия по защите территории Крымского района Краснодарского края от негативного воздействия вод рек Адагум, Неберджай, Баканка [5]. Выполняются инженерные работы по преобразованию русла р. Адагум между ее истоком (слияние Неберджая и Баканки) и Варнавинским водохранилищем. Они включают спрямление, изменение шероховатости дна и бортов русла, формирование стандартных сечений, способных пропускать паводки 1 % обеспеченности ( $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Целью настоящей статьи является оценка влияния проводимого преобразования русла р. Адагум в окрестностях Крымска на прохождение дождевых паводков.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве материалов в работе использованы:

1. Цифровые модели местности (ЦММ) естественного и преобразованного русла. Построение первого варианта (естественное русло) ЦММ проведено в несколько этапов: оцифровка топографических данных из рабочей документации по трансформации русла (точек со значениями высоты, линий перегиба, горизонталей, линий откосов и пр.) [5]; создание TIN-модели [6] поверхности, преобразование ее в растр с пространственным разрешением  $1 \times 1 \text{ м}$ , наложение на полученный растр значений высоты зданий и сооружений (на основе данных OpenStreetMap [7]). Второй вариант (преобразованное русло) ЦММ предусматривал создание на основе данных проектной документации (продольных профилей бортов и дна проектируемых элементов русла, пространственного их размещения) [5] растра деформированного русла и замещение им первого варианта ЦММ.

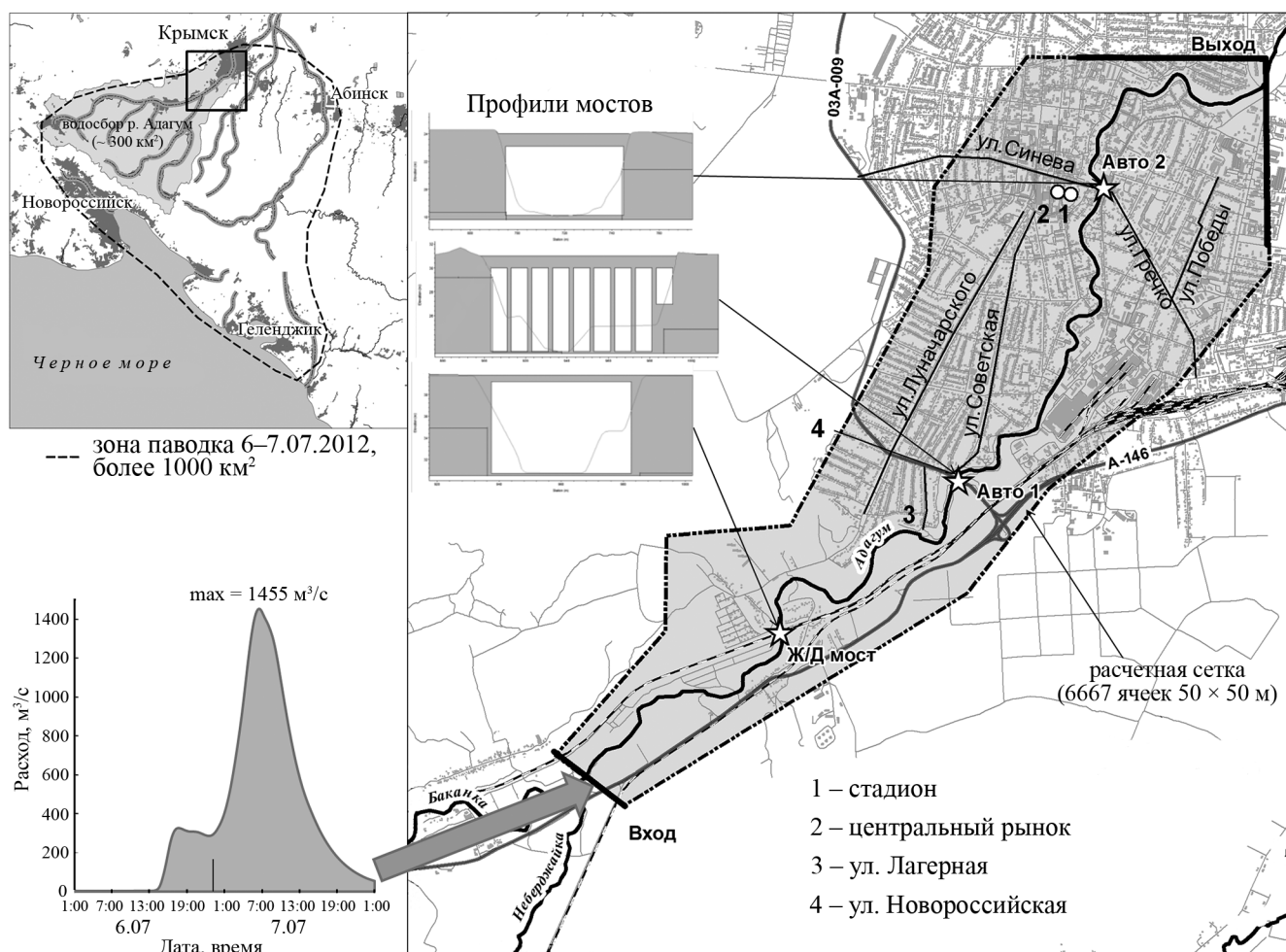


Рис. 1. Расчетная сетка гидрологической модели долины р. Адагум и использованная динамика расходов.  
Fig. 1. Computation mesh of hydrologic model of the Adagum river valley and the entire flow data.

2. Расход воды при слиянии Баканки и Неберджаевая (рис. 1), рассчитанный при реконструкции паводка в работе [8].

3. Распределение шероховатости поверхности речной долины на основе информации источника [5] и по данным сайта «Planet OSM» [7].

Для оценки влияния преобразования русла р. Адагум на прохождение паводков в окрестностях Крымска использована гидрологическая модель HEC-RAS 5.0 [9]. Выбор гидрологического моделирования в качестве основы работы обусловлен тем, что оно позволяет проводить сценарные расчеты при изменении лишь одного фактора прохождения паводка (без изменений других), что позволяет оценить его влияние. Гидрологическая модель HEC-RAS 5.0 дает возможность рассчитывать двумерные потоки на основе уравнений Сен-Веннана с учетом морфологии поверхности расчетной области. В ней была настроена двумерная расчетная сетка, в ячейках которой вычисляются значения

высоты водной поверхности на основе динамики расходов или уровня, заданных на границах сетки. В гидрологической модели долины р. Адагум (рис. 1) регулярная расчетная сетка деформируется линиями железнодорожной магистрали Крымск – Новоросси́йск (железнодорожный мост), автомобильных мостов с примыкающими автодорогами Крымска: Авто 1 (по ул. Новоросси́йской), Авто 2 (по улицам Синева – Гречко), бортов русла. Для линий деформации заданы условия, имитирующие железнодорожную насыпь, мосты с проемами, для которых установлены режимы пропускной способности (закрывание, открывание во время паводка, разрушения и др.). Расчетная сетка содержит около 6,6 тыс. ячеек, средний размер которых составляет 2,5 тыс. м<sup>2</sup> (общая площадь 16,5 км<sup>2</sup>), и охватывает юго-западные окрестности Крымска и большую часть города.

Для моделирования влияния железнодорожного моста на течение речных вод выше Крымска и ав-

томобильного моста в створе ул. Новороссийской на прохождение паводка были проведены расчеты для различных режимов пропускной способности проемов мостов.

Расчеты проводились по трем сценариям:

1. С открытыми проемами на протяжении всего расчетного периода (высота свободного проема железнодорожного моста составляет 8,5 м, автомобильного – 7 м).

2. С закрытыми проемами с начала расчетного периода (высота проемов мостов в первый час составляет максимальные значения, как в первом сценарии, а со второго часа расчетного периода – 0 м для обоих мостов).

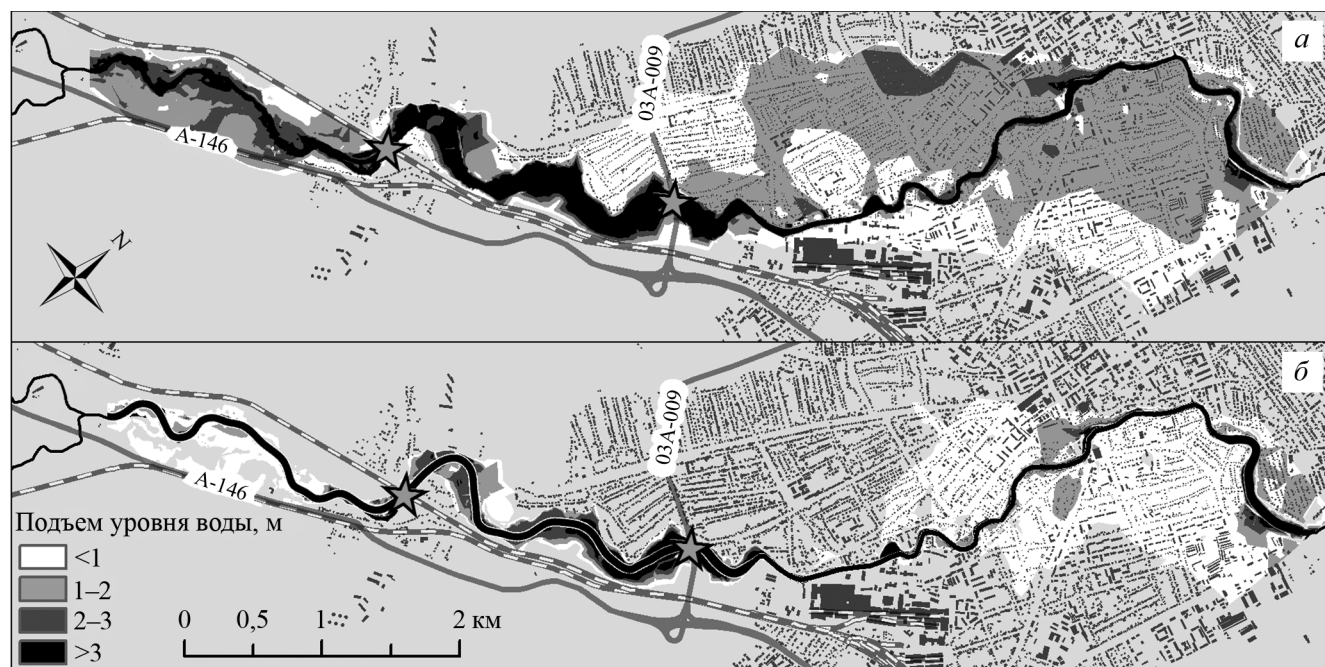
3. Проемы мостов открыты, как в первом сценарии, до 21:00 6 июля, затем закрываются наглухо мусором к 00:00, затем завалы мусора прорываются водой в 03:00 7 июля; свободная высота составляет 8 м для железнодорожного и 6,5 м для автомобильного моста.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов прохождения паводка 6–7 июля 2012 г. в Крымске были рассмотрены с точки зрения уровней зоны затопления, времени наступления затопления и максимальных скоростей водного потока.

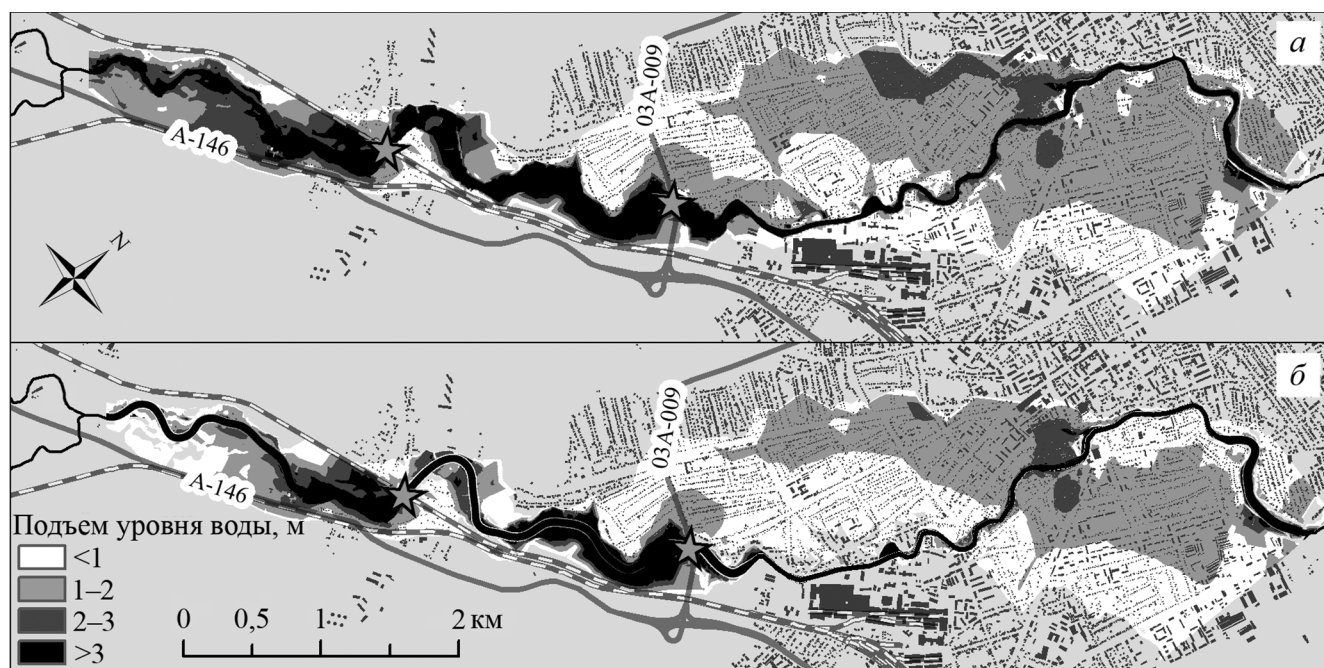
**Уровни зоны затопления.** В рабочей документации [5] по канализации русла р. Адагум рассчитано, что паводок вероятностью 1 раз в 100 лет соответствует расходу 1040 м<sup>3</sup>/с и ему не будут противостоять серьезные механические препятствия. Другими словами, канализованное русло не будет зарастать, проемы мостов будут свободными, шероховатость дна русла не будет увеличиваться, а глубина потока при таких условиях не превысит 5,8 м на участках земляного трапецевидного русла и 6,55 м на участке бетонного лотка.

Зоны затопления, рассчитанные для естественного и канализованного русла по сценарию 1 (с открытыми проемами мостов), представлены на рисунке 2. При естественном русле зона затопления охватывает большую часть Крымска, в значительной части зоны уровень затопления превышает 1 м. Левобережье Крымска будет затоплено вплоть до ул. Луначарского, правобережье – примерно до ул. Победы. В условиях канализованного русла зона затопления охватывает предусмотренную в рабочей документации [5] область и некоторые прилегающие территории. Затопление более чем на 1 м приурочено к долине р. Адагум выше Крымска, однако она в настоящее время не является застроенной. Небольшое затопление затронет центр города, район рынка и стадиона, однако уровень подъема воды здесь редко превышает 1 м. В целом



**Рис. 2.** Глубины затопления территории в условиях открытых проемов мостов (сценарий 1) при естественном (а), канализованном (б) русле. Мосты обозначены звездочками.

**Fig. 2.** Flood depths in conditions of free bridge gates (scenario 1) in natural (a) and transformed (b) channel. Bridges are asterisked.



**Рис. 3.** Глубины затопления территории в условиях закупоренных проемов мостов (сценарий 2) при естественном (а), канализованном (б) русле. Мосты обозначены звездочками.

**Fig. 3.** Flood depths in conditions of clogged bridge gates (scenario 2) in natural (a) and transformed (b) channel. Bridges are asterisked.

большая часть застроенной площади города при таких условиях не подвергнется затоплению при прохождении паводка, аналогичного произошедшему 6–7 июля 2012 г.

В зоне затопления различия максимальных уровней воды при естественном и трансформированном русле наиболее существенны вдоль русла, особенно перед мостами, а также на левобережье. При этом канализация русла приводит к изменению затопления русла.

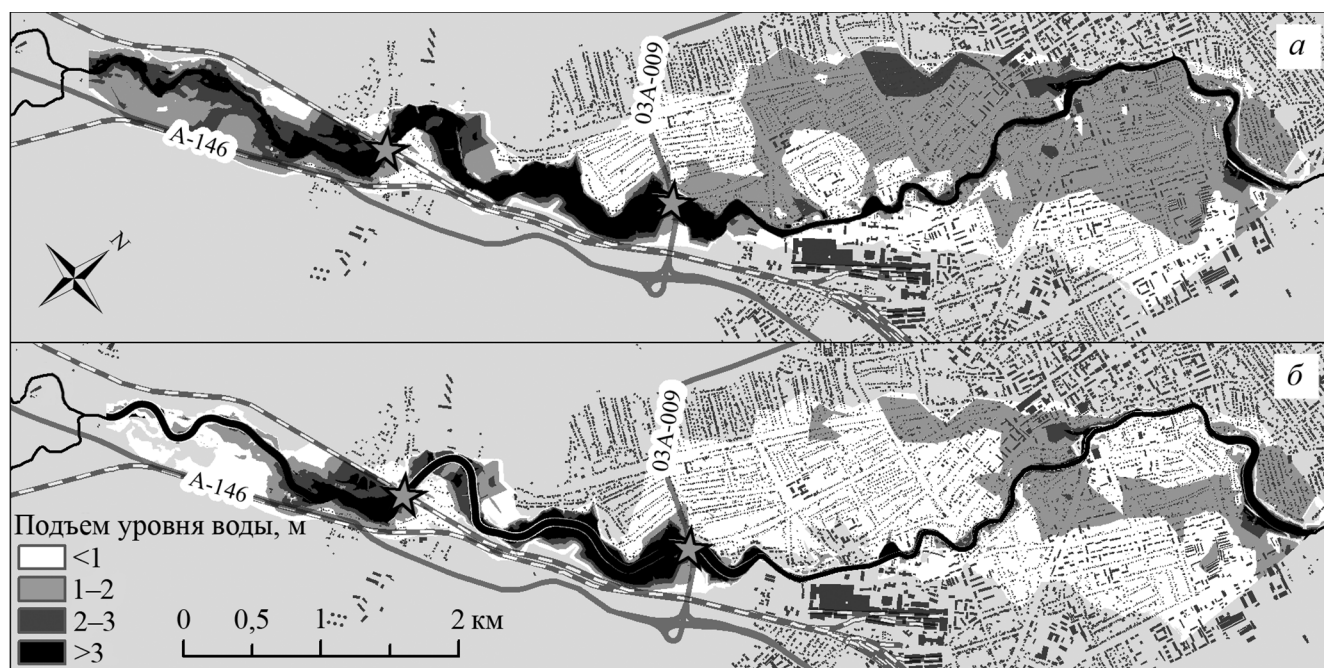
При сценарии 2 проемы мостов оказываются закупоренными мусором, что приводит к снижению их способности пропускать воду и к формированию подпора выше мостов. В таком случае рассчитанные зоны затопления показывают небольшую разницу при естественном и канализованном русле (рис. 3). Наибольшие различия в уровне воды рассчитанных зон относятся к участкам русла непосредственно после закупоренных мусором мостов: при канализованном русле уровень воды в этих местах снижен. Однако подпор перед мостами формируется не меньший, чем при естественном русле. В целом для этого сценария зоны затопления примерно одинаковы и на большей части зоны затопления максимальные уровни изменяются менее чем на 1 м.

Сценарий 3, характеризующий закупоривание мостов с дальнейшими их прорывами, представ-

ляет собой промежуточный вариант прохождения паводка по сравнению с другими сценариями. Закупоривание мостов приводит к формированию подпоров и установлению максимального уровня более 3 м в русловой и прирусловой частях долины в условиях обеих морфологий русла (рис. 4). При этом разница уровней воды в обоих случаях незначительна (менее 1 м). Перед мостами максимальный уровень при трансформированном русле превышает аналогичный при естественных условиях, ниже мостов – незначительно уступает ему. В целом заметные различия относятся к прирусловой территории непосредственно после автомобильного моста в створе ул. Новороссийской.

Полученные результаты показывают, что с точки зрения площади и глубины канализованное русло оказывает должный противопаводковый эффект в условиях открытых проемов мостов, снижая средний уровень воды, но не сокращает зону затопления при условии закупоривания мостовых проемов мусором.

**Динамика затопления.** Рассчитанные для трех сценариев зоны затопления ранжировались по времени затопления. На рисунке 5 представлены графики сравнения площадей по времени затопления в зависимости от сценария в условиях естественного или преобразованного русла. При всех расчетах наблюдается две волны затопления, первая – между



**Рис. 4.** Глубины затопления территории в условиях переменной пропускной способности мостов (сценарий 3) при естественном (а), канализованном (б) русле. Мосты обозначены звездочками.

**Fig. 4.** Flood depths in conditions of variable capacity of bridge gates (scenario 3) in natural (a) and transformed (b) channel. Bridges are asterisked.

12 и 20 часом паводка, вторая – между 22 и 30 часом. При сценарии 1 преобразование русла приводит к сильному сокращению площади затопления (почти в 2 раза) и смещению затопления на более позднее время. Преобразование русла при сценарии 2 приводит к небольшому сокращению суммарной площади затопления (с 8 до 7,1 км<sup>2</sup>) при слабом смещении по времени. При сценарии 3 наблюдается сокращение площади затопления, а также уменьшается первая волна затопления и растет вторая при общем сохранении времени пиков.

**Скорости водного потока.** Наряду с уровнем воды в зоне затопления и временем затопления важным фактором с точки зрения опасности является скорость течения паводкового потока. В связи с этим для трех сценариев состояния мостов также были вычислены максимальные скорости течения паводковых потоков. Разработанная ОАО «Кубаньводпроект» трансформация русла была рассчитана на рост русловых скоростей водного потока для увеличения пропускной способности русла и минимизации зоны затопления. Кроме непосредственно геометрических изменений профиля русла подразумевается изменение его шероховатости: снижение до 0,03 в земляном русле и до 0,018 в бетонном лотке. В таблице 1 представлено распределение площади затопления по максимальным

скоростям для естественного и преобразованного русла с учетом этих изменений.

В естественных условиях скорость течения при открытых мостовых проемах достигает максимальных значений в русле непосредственно перед ключевыми мостами и после них – до 2 м/с. На большей части русла максимальная скорость потока составляет 1–1,5 м/с, достигая 2 м/с в местах резких поворотов или сильного сужения русла. На большей части зоны затопления максимальные скорости находятся в пределах 0,5–1 м/с, а по краям этой зоны падают ниже 0,5 м/с. После трансформации долины русловые скорости водного потока по всей длине не превышают 2 м/с, в то время как на затопленной надпойменной террасе не достигают 0,5 м/с.

При втором сценарии в условиях естественного русла распределение максимальных скоростей водных потоков по зоне затопления имеет характер, схожий с таковым в первом сценарии. В зоне подпоров максимальные скорости водного потока несколько меньше, ниже подпоров – значительно больше при обоих вариантах морфологии русла. Потоки с повышенными скоростями распределяются вдоль закупоренных мостов. В условиях канализованного русла скорости водного потока в русле значительно превышают 2 м/с. На большей части затопляемого правого и левого берега при

естественных условиях распределение скоростей схоже с таковым в первом сценарии. При трансформированном русле максимальные скорости воды приурочены к руслу реки, на затопляемых пойменных территориях – к потоку, прорывающему подпоры. Однако водный поток в этих условиях медленнее, чем в естественном русле. Некоторые строения в городе усиливают водный поток, однако он не превышает 1 м/с. Наиболее опасными зонами с точки зрения скорости водного потока при обоих вариантах морфологии долины являются прирусловые территории выше Крымска. По расчетам, трансформация русла снизит скорость воды в пойме перед железнодорожным мостом.

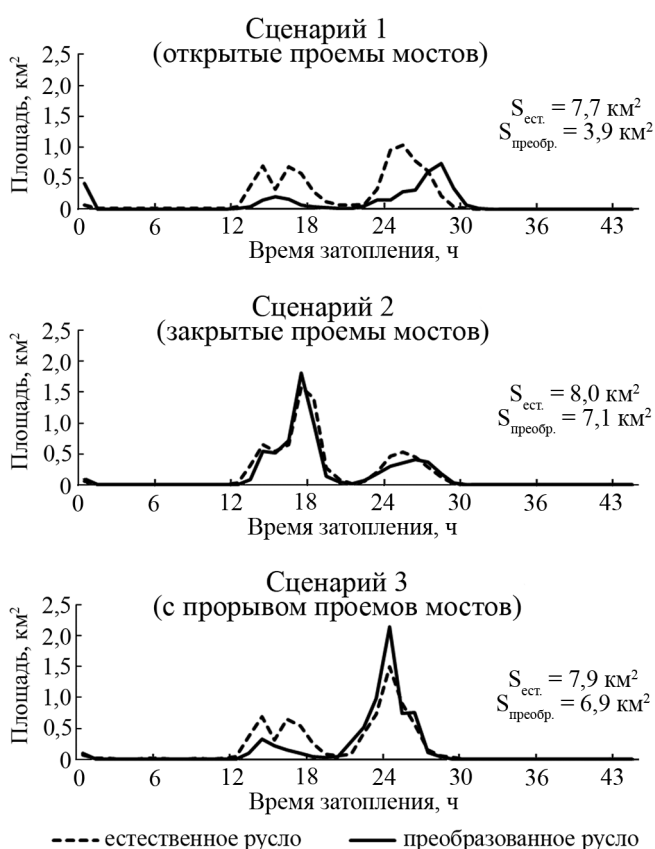
Третий сценарий закупоривания мостовых проемов приводит к результатам, схожим с таковыми во втором сценарии: происходит затопление большей части Крымска при обоих вариантах морфологии русла, однако в новых условиях скорости водного потока в пойме несколько снижены. Прорыв мостов приводит к повышению максимальных скоростей в русле перед подпорами и к большему снижению скорости на лево- и правобережье.

## ВЫВОДЫ

Представлено сравнение прохождения паводка 6–7 июля 2012 г. в условиях естественного и преобразованного русла, чтобы оценить противопаводковую эффективность проводящихся мер с учетом возможной роли замусоривания мостовых проемов. Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы:

1. В условиях незамусоренных мостовых проемов канализование русла приводит к значительному сокращению затопленных площадей. При замусоренных мостовых проемах канализование русла слабо влияет на сокращение затопленных площадей и изменение максимальных уровней воды.

2. Канализование русла приводит к смещению времени затопления, что в наибольшей степени проявляется в сценарии с открытыми мостовыми проемами. Затопление Крымска и его окрестностей происходит в два этапа, при открытых мостах пло-



**Рис. 5.** Время затопления площадей по сценариям в условиях естественного и преобразованного русла.

**Fig. 5.** Flood time in conditions of natural and transformed channel by scenarios.

щади затопления равноценны, при закрытых мостах первый этап мощнее, при закрытых мостах с последующим прорывом мощнее второй этап.

3. Максимальные скорости водного потока во всех сценариях при канализовании русла усиливаются в русле реки и сокращаются на надпойменных террасах.

4. Для усиления противопаводкового эффекта проводящегося преобразования русла необходима реконструкция мостовых проемов в целях недопущения их замусоривания при прохождении паводков.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О ходе расследования уголовных дел, возбужденных по фактам массовой гибели людей вследствие наводнения в Краснодарском крае. 2012. Следственный комитет Российской Федерации. URL: <http://sledcom.ru/news/item/516385> (дата обращения: 20.03.2017).
2. Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Швердяев И.В. 2012. Результаты экспедиционных исследований в районе паводка

на Западном Кавказе (июль 2012 г.). *Вестник Южного научного центра*. 8(4): 101–104.

3. Котляков В.М., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Лихачёва Э.А., Маккаев А.Н., Медведев А.А., Рудаков В.А. 2012. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 6: 80–88. doi: 10.15356/0373-2444-2012-6-80-88
4. Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Швердяев И.В. 2014. Катастрофический паводок на Западном Кавказе в июле

- 2012 года: причины и последствия. *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 4: 291–303.
5. ЗАКУПКА №0318200063914002445. URL: <http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/common-info.html?regNumber=0318200063914002445> (дата обращения: 14.04.2016).
  6. Peucker T.K., Fowler R.J., Little J.J., Mark D.M. 1978. The triangulated irregular network. In: *Proceedings, American Society of Photogrammetry: Digital Terrain Models (DTM) Symposium, St. Louis, Missouri, May 9–11, 1978*: 516–540.
  7. *Planet OSM*. URL: <https://planet.openstreetmap.org> (дата обращения: 20.03.2017).
  8. Матишов Г.Г., Клещенков А.В. 2012. *Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогноз. Крымск, июль 2012 г.* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 116 с.
  9. *HEC-RAS: River Analysis System. Applications Guide. Version 5.0. February 2016*. URL: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Applications%20Guide.pdf>.
  3. Kotlyakov V.M., Desinov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Likhacheva E.A., Makkaveev A.N., Medvedev A.A., Rudakov V.A. 2012. [Flash Flood in Krymsk, July 6–7, 2012]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 6: 80–88. (In Russian). doi: 10.15356/0373-2444-2012-6-80-88
  4. Matishov G.G., Kleshchenkov A.V., Sheverdyayev I.V. 2014. [Disastrous flashflood in the Western Caucasus in July 2012: causes and consequences]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 4: 291–303. (In Russian).
  5. ЗАКУПКА №0318200063914002445. [Public purchase No 0318200063914002445]. Available at: <http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/common-info.html?regNumber=0318200063914002445> (accessed 14 April 2016). (In Russian).
  6. Peucker T.K., Fowler R.J., Little J.J., Mark D.M. 1978. The triangulated irregular network. In: *Proceedings, American Society of Photogrammetry: Digital Terrain Models (DTM) Symposium, St. Louis, Missouri, May 9–11, 1978*: 516–540.
  7. *Planet OSM*. Available at: <https://planet.openstreetmap.org> (accessed 20 March 2017).
  8. Matishov G.G., Kleshchenkov A.V. 2012. *Kubanskiy pavodkovyy krizis. Klimat, geomorfologiya, prognoz. Krymsk, iyul' 2012 g.* [The Kuban flood crisis. Climate, geomorphology, forecast. Krymsk, July 2012]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 116 p. (In Russian).
  9. *HEC-RAS: River Analysis System. Applications Guide. Version 5.0. February 2016*. Available at: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Applications%20Guide.pdf>.

## REFERENCES

Поступила 22.09.2017