Наводнение в Крымске: причины и механизмы затопления города

И. Н. Днестрянский, Ю. И. Лобановский

Многие вещи нам непонятны не от того, что наши понятия слабы, а от того, что сии вещи не входят в круг наших понятий.
К. Прутков

Краткое содержание

В работе рассмотрены механизмы затопления города Крымска в ночь на 7 июля 2012 года во время разрушительного наводнения на Кубани, в связи с тем, что 90 % жертв региональной катастрофы приходится на этот сравнительно небольшой город. Проведена оценка расходов воды, проходивших в реке Адагум, на берегах которой расположен Крымск, объемов и уровней воды, затопившей город к моменту катастрофы, то есть к 3 часам ночи. Показано, что максимальный расход превышал среднегодовой примерно в 700 раз.

Выявлены две зоны или два «пятна смерти», по которым пришелся наибольший удар стихии, – сравнительно небольшие по площади районы города, в которых сконцентрировано подавляющее большинство жертв затопления. При этом оказалось, что около ⅔ из них жило в левобережной зоне, расположенной на возвышенном берегу реки, несмотря на то, что к моменту катастрофы этот участок города был залит водой на глубину в среднем не более чем 1 м. Найдена причина смертельного парадокса – затопление этой зоны волной типа бора, то есть ударной волной, возникшей на поверхности левобережного мелководья при втекании туда «горба воды», сформировавшегося в горах на притоках Адагума. На основании свойств таких волн дана оценка ее высоты – она оказалась примерно равной 3 м, что оказалось достаточным для гибели многих десятков людей.

Ключевые слова: наводнение – Кубань – Крымск – Адагум – осадки – сток – расход – затопление – волна – бор – пороpока

Таблица символов

u – скорость потока или тела
v – скорость поверхностной волны
c – скорость звука
g – ускорение свободного падения
H – глубина слоя воды
h – высота волны
k_t – коэффициент извилистости реки
M – число Маха

I. Введение

В ночь с 6 на 7 июля 2012 из-за проливных дождей в Краснодарском крае произошло сильное наводнение. По данным из официальных источников погибло 168 человек [1], что позволяет квалифицировать произошедшие события как региональную катастрофу. Из крупных населенных пунктов наиболее сильно пострадал город Крымск, расположенный на берегах обычно почти пересыхающей в летние месяцы реки Адагум. По состоянию на утро 26 июля 2012 на официальном сайте оперативного штаба по ликвидации последствий в городе Крымск сообщалось, что там погибло 153 человека [2]. Таким образом, по официальным данным, более 90 % жертв приходится на этот сравнительно небольшой город.

В последовавшем за катастрофой обсуждении ее причин было показано, что произошедшее – не случайность. Крымск периодически затапливался, 9 августа 2002 года скорбный список погибших составил около 50 человек, выше в горах были смыты два населенных пункта – Верхний Адагум и Нижнебаканская [3]. Так что новым тут является только масштаб бедствия – никогда еще в истории этих мест не было стольких жертв от потопа. То, что беспрецедентная катастрофа было спровоцирована чрезвычайно высокими, не наблюдавшимися никогда ранее осадками [4], – в этом сомнений нет

Однако, такие вопросы как причины, вероятность и периодичность повторения в горах западной оконечности Северного Кавказа подобных осадков (которые после событий 2002 и 2012 годов надо рассматривать более чем серьезно), не являются предметом данной работы. Есть другой, очень важный аспект – конкретные механизмы затопления города, несмотря на прошедшие с момента самого события уже

4 недели, так и не были серьезно рассмотрены[*)]. Вместо этого вбрасывается большое количество мало чем обоснованных суждений, в которых в качестве причины такого большого количества жертв в Крымске объявляется то или иное умозрительное обстоятельство, которое при дальнейшем рассмотрении зачастую оказывается просто выдуманным. В то же время, эти механизмы и сопровождающие их явления могли в значительной степени усугубить последствия катастрофы и повлиять на число человеческих жертв.

Последним на момент написания этих строк примером подобного рода суждений оказалось заявление директора Росгидромета А. Фролова на пресс-конференции о том, что «долина реки Адагум в месте образования и до Крымска очерчена железнодорожной насыпью и насыпью автодороги. Река сужается к Крымску, и при приближении к городу насыпи играют роль дамб, формируя плотину» [4]. Достаточно провести на карте простейшие измерения по карте, чтобы убедиться, что минимальное расстояние между этими «дамбами» составляет около 370 м. При расходе воды 2250 $м^3$/с и скорости потока 5 – 6 м/с (эти параметры будут далее обоснованы в данной работе) глубина потока даже на совершенно плоской равнине и без учета долины реки Адагум составила бы не более 1 м. «Кроме того, рядом с железнодорожным мостом была запруда. Произошел подъем уровня до 7 – 8 метров, в результате подпорная волна затопила часть Крымска» [4]. Проводившему пресс-конференцию директору Росгидромета, очевидно, вплоть до момента его выступления осталось неизвестным, что в узкой долине Адагума при бывших ночью 7 июля 2012 года расходах воды в реке, она была способна подниматься на 7 – 8 м, а то и выше, вообще безо всяких запруд. При этом ширина затопления и глубина воды, естественно, коррелируют между собой, но только в обратной пропорции.

Таким образом, требуется беспристрастный и опирающийся на факты и расчеты, а не на мнения и слухи, анализ произошедших событий. Он должен объяснить некоторые особенности событий, удивлявшие тех, кто оказался в их эпицентре, а не на московских пресс-конференциях. Первой такой особенностью является то, что бóльшая часть погибших (до двух третей) оказалась с левого, более высокого берега реки Адагум. В процессе элементарной обработки имеющихся данных были выявлены и другие, совершенно необъяснимые с точки зрения вброшенных в средства массовой информации версий этой катастрофы.

[*)] – по истечении 7 месяцев после катастрофы по этой проблеме не зафиксировано ничего существенно нового (примечание ко второму изданию данной статьи).

II. Два «пятна смерти» на карте Крымска

Рассмотрим распределение известных адресов регистрации проживания погибших ночью 7 июля жителей Крымска. Таковых на момент проведения данной работы было 74, то есть 48 % от 153 – общего числа погибших в городе [5], что является вполне представительной выборкой из всего массива информации. Подавляющее большинство из них – старики и, к сожалению, дети, для которых расхождения адресов регистрации и реального проживания в данных условиях маловероятно. Поэтому, если нанести на карту города точки, соответствующие этим адресам, можно с достаточной степенью точности определить, где тонули эти люди.

Результаты такого элементарного построения, представленного на рис. 1, оказались совсем нетривиальны. Совершенно определенно можно утверждать, что имеются две зоны гибели – два «пятна смерти» на карте Крымска, одно на левом, и другое – на правом берегах. В левобережное пятно смерти попадает 50 точек, в правобережное – 20 (и туда еще входят 3 точки на левом берегу у реки в самом конце этого пятна). Только 1 точка из 74 оказывается вне этих пятен значительно выше по реке в окрестности ее входа в город еще перед шоссе, опоясывающем Крымск с запада и с юга. При этом, как будет видно далее, эта точка вообще находится вне зоны затопления. Она отмечает смерть старушки 84 лет от роду [5]. Поэтому, весьма вероятно, что старушка просто умерла в ту страшную ночь, а не утонула, и эту точку вообще следует исключить из рассмотрения.

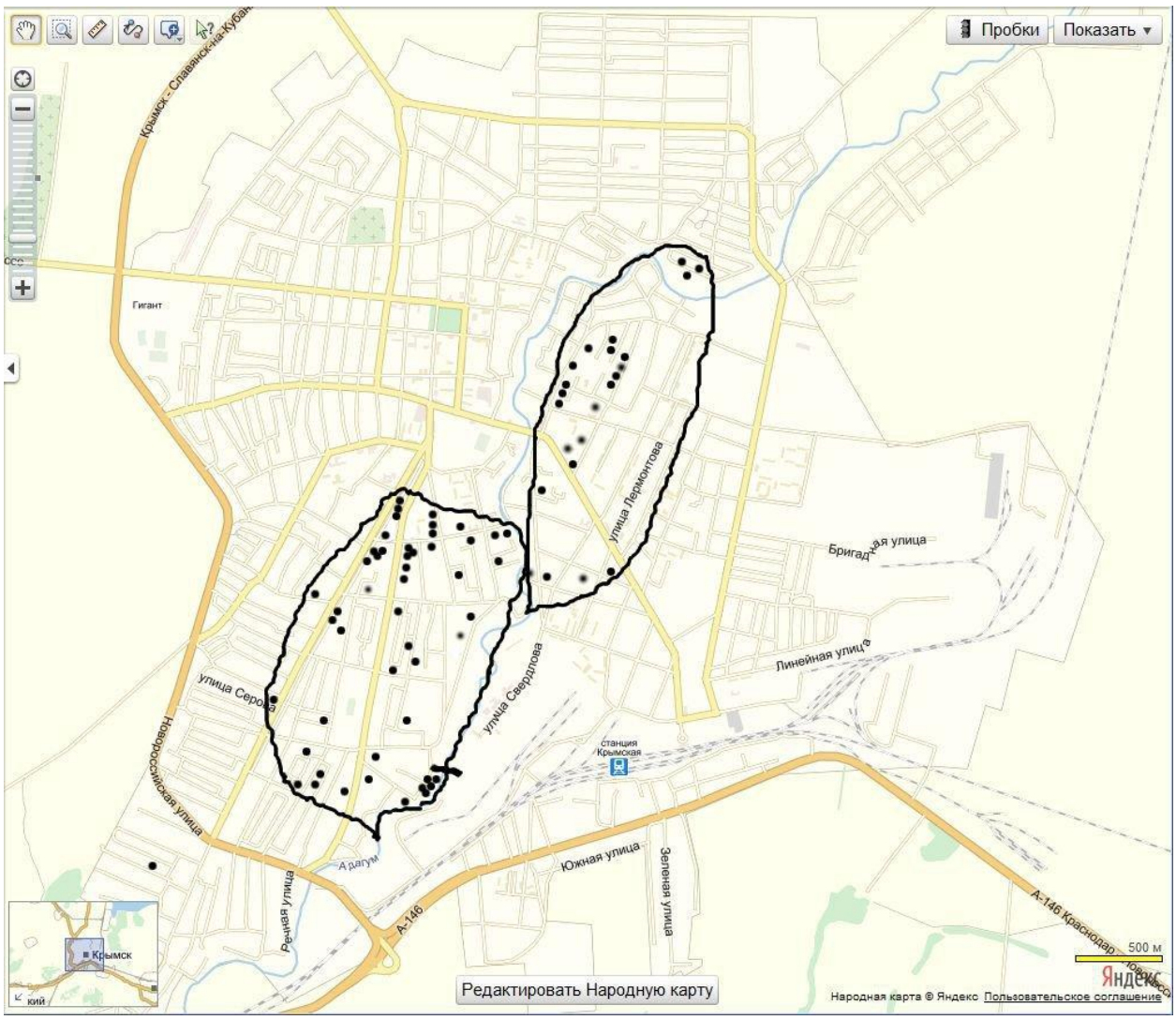

Рис. 1

Левое пятно представляет собой почти прямоугольник длиной около 1.8 км и шириной около 0.9 км. Именно на эту площадь в 1.6 км^2, что составляет менее 11 % от общей площади затопления, равной 15 км^2 [6], приходится около ⅔ всех жертв. Правая граница пятна проходит примерно по реке, левая – по улице Луначарского, то есть, видимо, по имеющемуся там пока слабому поднятию местности, которое чуть левее можно уже увидеть на картах рельефа Гугл. Левобережное пятно смерти начинается на крутом повороте Адагума вправо и заканчивается практически прямолинейной границей в окрестности пересечения перпендикулярной реке Переяславской улицы с прибрежной улицей Адагумской и сходящимися вместе улицами Ленина, Советской и Луначарского, которые находятся в нескольких сотнях метров от реки. По свидетельству очевидца, не более чем в 100 – 200 м от этой границы находится совершенно целое, не разрушенное наводнением стеклянное «кафе в немецком стиле» [7]. При этом, наибольшая концентрация смертей, как видно из рис. 1, наблюдается именно у завершающей границы этого пятна. Таким образом, создается впечатление, что по этой зоне будто бы проехал какой-то смертельно опасный каток, который по ходу своего движения становился чем дальше, тем опаснее, и вдруг неожиданно он «сломался» и исчез, не оставив никаких следов своего существования кроме полосы смертей и разрушений. Кроме того, необходимо отметить, что левобережная сторона Адагума по границе пятна на 2 с лишним метра выше, чем правобережная, что сильно ограничивает возможные глубины затопления левобережья. На рис. 1 короткой чертой пересекающей правую границу пятна указано место расположения поперечного разреза долины реки Адагум (см. в источнике [8] «гидрологический поперечник» 2), где это хорошо видно.

Вся оставшаяся треть погибших также относится к четко локализованной и вытянутой вдоль реки области длиной около 2.2 км и шириной 0.5 – 0.7 км, площадью около 1 км^2. Левая граница этого пятна проходит примерно по реке, может быть, чуть в стороне от нее, правая, где-то за параллельной реке улицей Лермонтова, очень сильно пострадавшей от наводнения [7], но не имеющей на этой карте ни одной точки, соответствующей смертному случаю. Это вызвано либо тем, что база данных еще неполна, либо тем, что в многоэтажных зданиях этой улицы было легче спасаться от сравнительно медленно развивающегося

наводнения. Форма правобережного пятна вполне соответствует обычному затоплению местности, которая на 1.5 – 2.5 м ниже, чем сопредельные территории, смертей на которых не зарегистрировано.

В целом, как известно местным старожилам, эта область относится к зоне пониженного рельефа. Начинается она на излучине Адагума, где имеется понижение, как бы разрезающее правый берег реки. Через это понижение к реке подходит глубокая водосливная канава с территории Крымского консервного комбината, что придает этому понижению черты оврага или балки. В устье этой балки расположен мостик на частоколе свай, который может перехватывать мусор и создавать препятствия основному потоку в русле, направляя его в балку.

Таким образом, все твердо идентифицированные смертные случаи зафиксированы в двух зонах, общая площадь которых составляет менее 20 % от общей зоны затопления. В связи с этим любая модель затопления, адекватно описывающая реальность, должна объяснить, почему ⅔ всех жертв катастрофы – из левобережного пятна смерти, лежащего на местности метра на два более высокой, чем прилегающая к ней область правого берега, и почему это пятно смерти заканчивается резкой прямолинейной границей, после которой разрушения становятся минимальными.

Зона затопления по данным спутника детальной съемки земной поверхности системы «Плеяды» на момент не ранее 11 июля показана на рис. 2 [9]. Оттенками красного закрашена зона затопления городских кварталов. Так как с момента наводнения прошло не менее 4 дней, то вполне естественно, что ее площадь, составляющая по визуальным оценкам, 11 км^2, на 25 – 30 % меньше, чем по данным источника [6]. Тем не менее, не исключено и то, что даваемая в сводках площадь затопления Крымска несколько завышена. Черным контуром обведены примерные границы описанных выше пятен смерти.

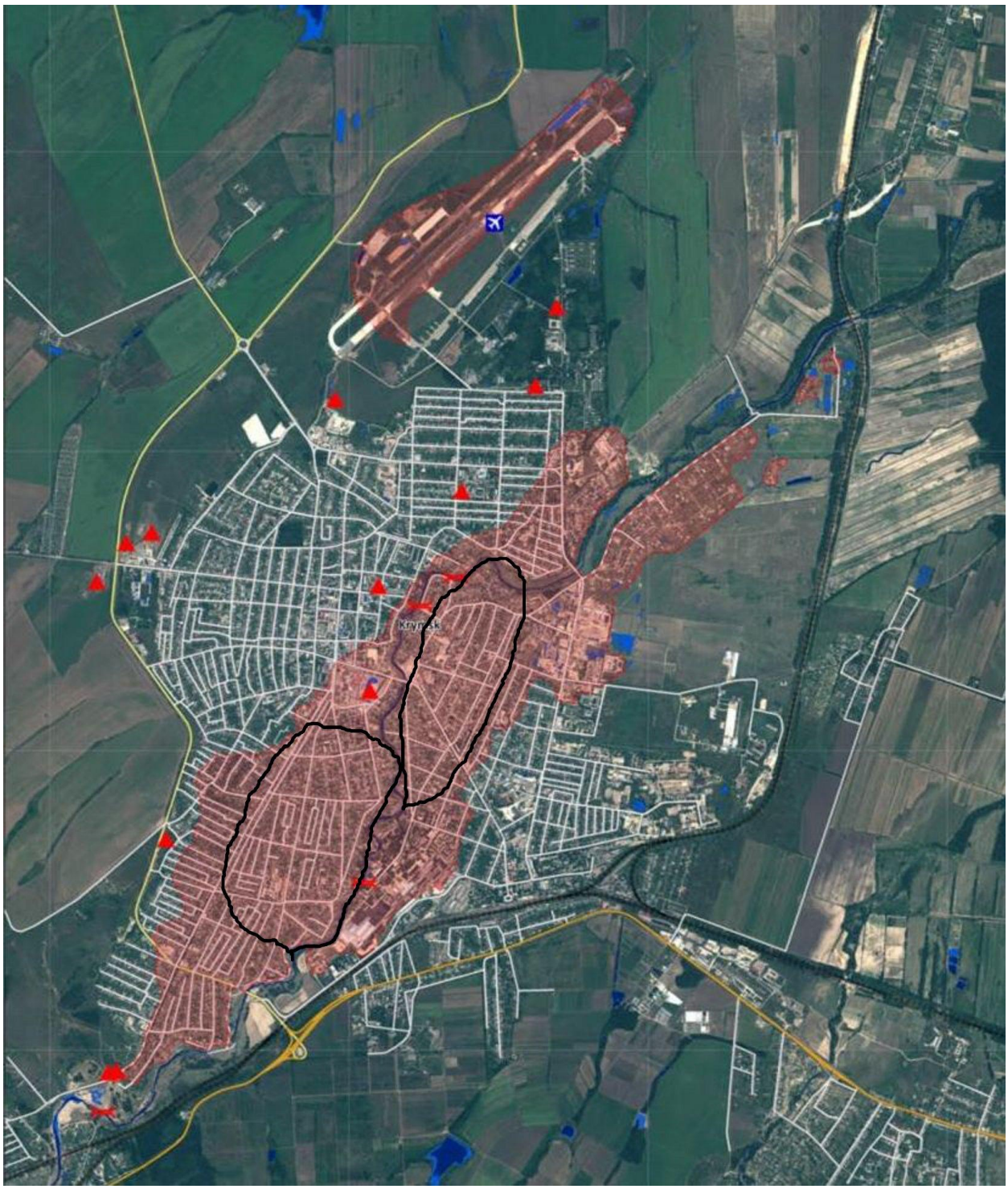

Рис. 2

III. Оценки притока и расхода воды в Адагуме, уровней ее подъема и скорости течения

Сначала рассмотрим, пусть и весьма приближенно, общий баланс потоков воды во время катастрофического наводнения. В течение дня 6 июля 2012 года с 9:30 до 19 часов в Новороссийске осадки составили 88 мм. В Крымске с 20:30 до 23 часов было зафиксировано 65 мм осадков. Сильнейшие ливни продолжались в течение ночи с 6 на 7 июля и последующего утра. 7 июля к 10 часам в Новороссийске добавилось еще 187 мм, в Крымске – 156 мм [10]. По указанным ниже причинам нас интересует количество осадков, выпавших до 6:30 – 7:00 часов утра 7 июля, поэтому считая, что ночные ливни начались в 23:30 – 0:00 часов, уменьшим количество ночных осадков на 30 %. Таким образом, в двух пунктах, наиболее близких к водосборной территории реки Адагум и ее притоков, по оценкам за интересующее нас время

выпало от 220 мм осадков (в Новороссийске) до 175 мм осадков (в Крымске). В качестве расчетной величины примем среднее значение – 200 мм осадков.

При этом следует упомянуть, что измерительных постов в районе ближайшего к городу Крымску хребта Свинцовый, находящегося в треугольнике между Крымском, Новороссийском и Геленджиком, просто нет. Этот хребет стоит как бы во втором ярусе за наиболее низкой частью возвышающегося над Новороссийском Маркотхского хребта, превышая последний по высоте в среднем на 100 – 150 м, а потому на нем вряд ли могло выпасть заметно меньшее, чем в Новороссийске, количество осадков. То есть, наша расчетная величина не должна быть завышенной.

По данным Государственного водного реестра [11] водосборная площадь рек, образующих Адагум – Баканки и Неберджая составляет, соответственно, 179 и 111 км^2. Следовательно, общая площадь водосбора Адагума при входе в Крымск близка к 290 км^2, и всего на этой территории днем 6 июля и ночью 7 июля вылилось около 58 миллионов кубометров воды. Как обычно, будем считать, что коэффициент стока составляет 70 % [12], то есть 30 % этого количество воды до Адагума не дошло из-за заполнения различных локальных низин и впитывания в почву. Тогда, общий объем вод, прошедшей по реке через Крымск в Варнавинское водохранилище, а также оставшейся в его окрестностях, оценивается в 40 миллионов кубометров. В самый последний момент, уже после фактического завершения этой работы появились данные из Росгидромета о том, что средний многолетний годовой объем стока реки Адагум у города Крымск равен 106.6 миллиона кубометров (то есть, среднегодовой расход воды в реке равен всего лишь 3.4 м^3/с), а объем стока в период паводка 6 – 7 июля составил 38 % от этой величины [13], то есть 40.5 миллионов кубометров. Это совпадает с приведенными здесь оценками катастрофического стока.

На входе в Варнавинское водохранилище находится гидропост, измеряющий расход воды в Адагуме. В 2 часа ночи 7 июля он был максимальным за все время измерений и составлял около 1500 м^3/с, снизившись к 8 часам утра до 200 м^3/с, при нормальном расходе в 180 м^3/с [14]. Что такое «нормальный расход» Адагума в 180 м^3/с в межень (то есть тогда, когда в реке воды меньше обычного), при том, что среднегодовой расход реки не превышает 3.5 м^3/с, – на это, видимо, могли бы ответить только авторы данной заметки. Тем не менее, именно тогда, судя по ней, произошло сильное снижение расхода в окрестности гидропоста, и острая фаза наводнения закончилась.

Расстояние от Крымска до водохранилища по реке равно 8 км, скорость течения при средних расходах (при наводнении) оценивается в 1.5 – 2 м/с. Поэтому от окраины города поток воды доходил за время 1 – 1.5 часа, и расчетное время для вычисления общего объема осадков и было уменьшено на эту величину по сравнению с моментом нормализации расхода на гидропосте. Сколько-нибудь значимых новых притоков от выхода из Крымска до Варнавинского водохранилища Адагум не имеет, вследствие этого в нормальных условиях расходы воды в реке в городе и на гидропосте в первом приближении можно считать одинаковыми.

Если считать, что весь приток воды из-за ливня – 40 миллионов кубометров прошел за указанные выше 7 часов через речной створ, то средний расход на входе в город составит 1770 м^3/с. Однако, спутниковые фотоснимки (см. рис. 3) показывают, что в нижнем течении Баканки и в верхнем течении Адагума существуют обширные области со следами прошедшего паводка, отмеченные на рис. 3 оттенками красного цвета [15]. Так что часть воды все же осталась в низинах перед Крымском. Кроме того, очевидно, что дождевая вода трансформируется в крупные потоки не сразу, что должно увеличить время стекания накопленной воды. При этом средний расход также уменьшится. С учетом этих поправок приближенно оценим его в Адагуме на входе в Крымск в 1500 м^3/с.

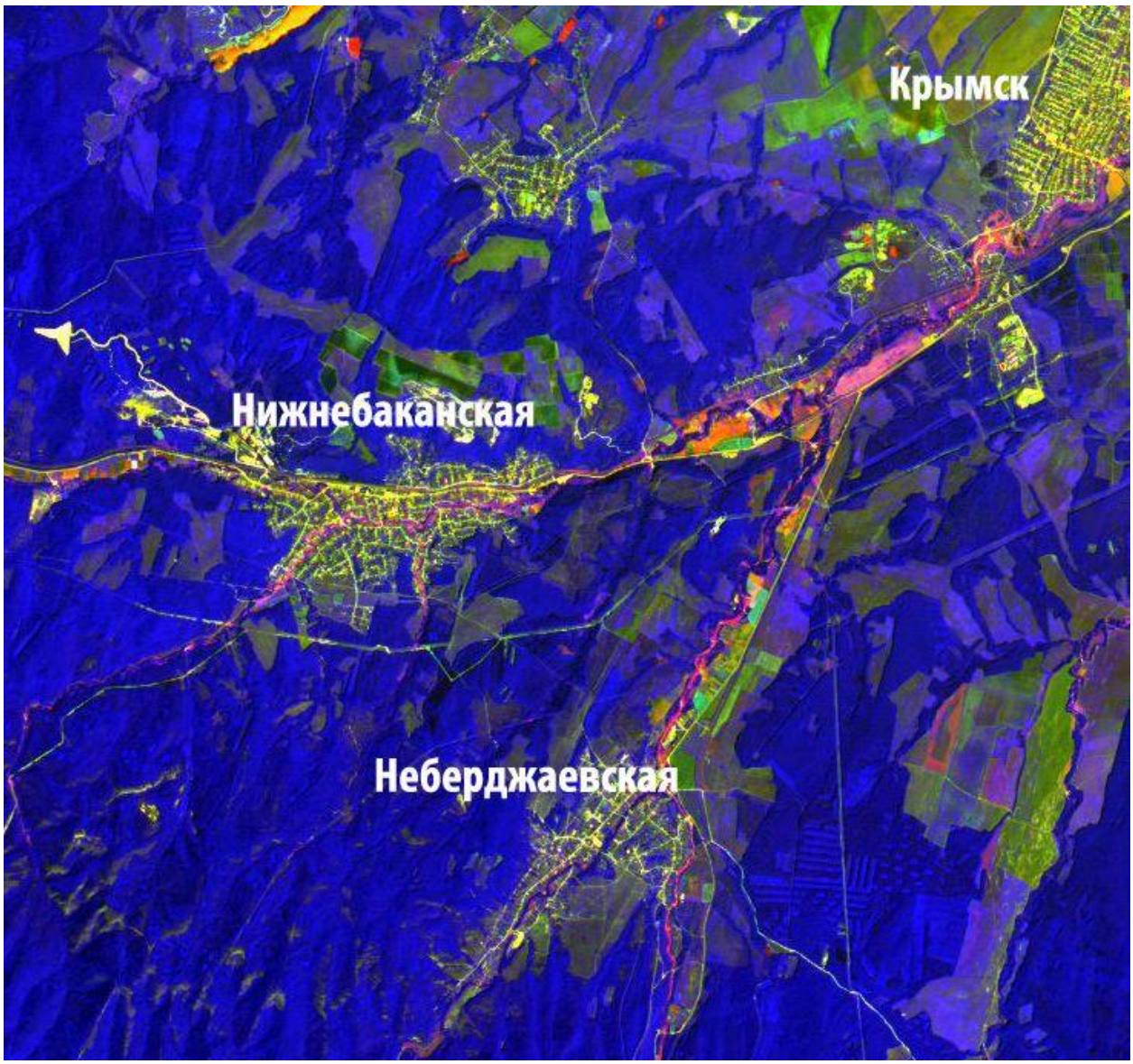

Рис. 3

Оценим и объем воды, затопившей город. Площадь затопления в городе, как уже упоминалось ранее, составляла по максимальной оценке 15 км^2 [6], и при средней толщине слоя воды в 1 м к утру там было накоплено порядка 15 миллионов кубометров. Длина долины Адагума – около 21.5 км, среднюю площадь поперечного сечения при таких расходах оценим в 250 м^2 (достоверность этих оценок будет описана ниже). Тогда ее объем составит порядка 5 миллионов кубометров. В низинах в окрестностях Крымска воды, по-видимому, осталось не намного меньше. Тогда в Варнавинское водохранилище за время острой фазы паводка стекло порядка 15 миллионов кубометров. Это приводит к оценке среднего расхода на гидропосте в 600 м^3/с, что при максимальном расходе 1500 м^3/с и при минимальном расходе около 0 в начале и 200 м^3/с в конце острой фазы паводка (то есть, в среднем – что-то около 800 м^3/с) кажется несколько заниженной величиной. Но, если это и так, то в городе после затопления осталось менее 15 миллионов кубометров воды, и тогда средний ее уровень был даже ниже 1 м, а, возможно, была меньше и площадь затопления.

Для того чтобы получить величину максимального расхода, используем данные по профилям поперечного сечения долины Адагума, его расходам и уровням воды в трех точках реки (см. [8]). Наиболее интересны для решения поставленной задачи сечения 1 и 2 – на входе в предместья Крымска и на правой границе левобережного пятна смерти. Данные по площадям поперечного сечения, расходам воды и ее глубинам в двух верхних строчках каждого из двух первых разделов таблицы 1 взяты из источника [8]. Средняя скорость потока вычисляется делением расхода на площадь. Данные при бóльших расходах получены линейной экстраполяцией по расходу.

Таблица 1

Сечение долины	Площадь ($м^2$)	Расход ($м^3/с$)	Скорость (м/с)	Глубина (м)	Уклон (м/км)
1	110	350	3.2	3.1	5.4
	200	830	4.2	4.7	
	270	1500	5.6	–	
	310	2250	7.2	–	
2	160	350	2.2	5.5	2.6
	300	830	2.8	6.4	
	420	1500	3.6	7.7	
	500	2250	4.5	–	
Автомост	375	1500	4.0	5.0 + 0.5	3.0
	450	2250	5.0	6.0 + 0.5	

Для определения уклонов реки в рассматриваемых точках были получены оценки коэффициента извилистости интересующих нас рек k_t, то есть отношения их длин между заданными точками к расстоянию между ними по прямой. Из источника [11] следует, что длина Баканки – одной из двух рек, образующих Адагум, равна 29 км, по прямой от его истока до слияния с Неберджаем – 22.4 км, поэтому коэффициент k_t этой горной речки равен 1.3. По спутниковым фотографиям максимального разрешения, представленным в Яндексе, было проведено тщательное измерение расстояния по реке между сечениями 1 и 2. Кроме того, аналогичные измерения были сделаны по самой подробной карте Яндекса. Оказалось, что реальная длина реки превышает ее значение, полученное по карте Яндекса в 1.04 раза, а коэффициент извилистости этого участка Адагума оказался равным 1.35. Все дальнейшие измерения длин интересующих нас участков реки проводились по карте Яндекса с умножением полученной величины на коэффициент 1.04. Чем дальше от гор, тем больше коэффициент извилистости. По известным перепадам высот и длинам соответствующих участков Адагума были получены оценки уклонов русла реки в расчетных точках, представленные в последнем столбце таблицы 1.

При установившемся течении воды имеется равновесие разгоняющих и тормозящих ее сил. В движение поток приводит направленная вдоль дна реки компонента силы тяжести, пропорциональная уклону, а тормозит сила гидравлического сопротивления, в первом приближении пропорциональная, как известно, квадрату скорости течения. Отсюда следует, что при фиксированном расходе для оценки можно считать, что скорость потока пропорциональна уклону в степени 0.5. Сравнение результатов, представленных при относительно малых расходах (в первых двух строках таблицы 1) в сечениях 1 и 2 хорошо подтверждает эту оценку. При бóльших расходах воды аппроксимация скоростей потока через уклоны улучшается при увеличении показателя степени до 0.6.

Опираясь на эти оценки, приближенно интерполяцией получим скорости потока под автодорожным мостом, расположенным между сечениями долины Адагума 1 и 2, ближе к точке 2 (см. 2 последние строки в таблице 1). Этот мост является своеобразными воротами в город Крымск для реки, так как к мосту подходит насыпь автодороги, препятствующие его течению иначе, как под ним, или уже через него и через насыпь. При очень высоком подъеме поток воды, в принципе, может течь и вдоль насыпи железной дороги (идущей примерно, параллельно шоссе) под виадуком над железной дорогой, но железнодорожная насыпь все-таки лежит намного выше реки, вероятно, приблизительно на уровне шоссе. Поэтому данный фактор, который мог бы привести к увеличению оценок максимальных расходов реки Адагум на входе в Крымск, здесь не рассматривается. Кроме того, как выяснилось позднее, данные мониторинга со спутников не свидетельствуют о заметных проливах воды через виадук (см. рис. 3).

Высота дорожного полотна моста над уровнем воды, полученная ее сравнением с высотой автомобиля типа седан или хэтчбек (1.5 м) по фотографии, представленной на рис. 4 [16], составляет около 6.5 м. При глубине реки в обычном состоянии не более 0.5 м, его полная высота будет около 6.5 – 7 м, что совпадает с данными из источника [17]. Расстояние до нижней балок моста на 1 м меньше, то есть глубина потока воды, касающегося их нижних поверхностей, составляла бы около 6 м.

Рис. 4

Длина пролета моста – около 90 м (см. рис.5), ширина между его основаниями – около 60 м. Из этих данных при заданном расходе легко получить глубину потока, текущего под мостом. Добавив 0.5 м на глубину номинального русла с пренебрежимо малой площадью сечения в этих оценках, получим, что при расходе 1500 м^3/с расстояние между его поверхностью и нижней балкой моста составит около 0.5 м. Для того, чтобы происходило захлестывание воды на мост (а то, что это было, видно по мусору, оставшемуся на его ограждении, см. фотографию 9 из источника [18]), необходим расход, который, как минимум, должен быть в полтора раза больше (см. таблицу 1). Повреждения покрытия откосов моста также свидетельствуют об уровне воды около 6.5 м и вряд ли выше 7 м. Таким образом, расход Адагума на входе в Крымск на максимуме был, по-видимому, близок к 2250 м^3/с, что почти в 700 раз больше среднегодового расхода реки. При этом не исключены кратковременные «всплески» потока с дополнительным ростом мгновенного расхода.

Рис. 5

Другие фотографии этого моста утром и днем 7 июля (рис. 6, 7) показывают, что после завершения острой фазы наводнения проходы между его опорами остались практически чистыми от крупного мусора (см. [19, 20]).

Рис. 6

Рис. 7

В целом, можно оценить конструкцию данного моста как адекватную и вполне отвечающую условиям даже произошедшего 7 июля 2012 года беспрецедентного затопления окружающей местности. Никаких

серьезных заграждений под этим мостом не возникло. Некоторые мосты перенесли удар стихии гораздо хуже, см., например, рис. 8 из источника [21].

Рис. 8

IV. Оценки уровней воды в Крымске в момент катастрофы и времени прохождения резких подъемов воды

Максимальный расход на гидропосте у Варнавинского водохранилища – 1500 м^3/с был зафиксирован в 2 часа ночи [14], дальше он падал, а катастрофа случилась около 3 часов. Расход воды в реке Адагум на входе в город был, как минимум, не меньше. Из сечения долины реки в точке 2 на границе первого из пятен смерти следует, что правобережная часть города начинает затапливаться примерно при уровне воды 5.5 м и расходе 350 м^3/с, а левобережная часть – при уровне воды 7 м и расходе примерно 1100 м^3/с (см. таблицу 1). Время прохождения воды от этой точки до гидропоста составляет по реке около 14 км, волна возмущения, вызванная изменением расхода при скорости порядка 4 – 5 м/с пройдет это расстояние примерно за час. Таким образом, около 2 часов ночи в потоке воды, текущем по Крымску произошли значительные изменения. Его растекание по городу, как следует из таблицы 1, началось заметно раньше, однако около 2 часов ночи растекание настолько усилилось, что начал снижаться расход в ядре потока, текущего по узкой долине реки.

При максимальном расходе 2250 м^3/с поток с расходом до 1000 м^3/с затапливал город, и к 3 часам ночи это продолжалось не менее 1.5 – 2 часов. Следовательно, количество воды в городе к моменту катастрофы можно оценить примерно в 5 – 7 миллионов кубометров, что составляет от ⅓ до ½ от объема воды в городе в конце затопления. Если считать, что к тому моменту она растеклась на ½ от затопленной площади, то есть, примерно, на 7 км^2, а ее средняя глубина на левом берегу вследствие его возвышенности хотя бы на 1.5 м меньше, чем на правом, то средние глубины затопления слева от реки не превышали 0.5 м. Безусловно, все эти оценки очень приближенны, ошибки возможны на десятки процентов, а то и в пару раз, но все же из этих оценок следует, что глубина воды на левобережье по порядку величины в среднем составляла не более 1 м, и утонуть в ней при сравнительно спокойном состоянии поверхности было бы затруднительно.

Теперь немного о том, что в это время происходило в горах на реках Баканка и Неберджай, образующих Адагум. «Жители Нижнебаканской, проживающие возле реки Барабашка, рассказали, что наводнение имело две фазы. Сначала станицу стало заливать поднявшейся водой 6 июля после 22 часов вечера. Потом вода стала спадать. А через несколько часов начался резкий и гораздо более мощный подъем воды в районе 2 часов ночи» [22]. Другой источник сообщает, что последовавший после первого подъема воды «после 22 часов» спад начался примерно в 23:10. «Вторая волна пришла после полуночи и спала лишь к пяти утра» [23]. От устья Барабашки до расчетной точки, где начинается левобережное пятно смерти, по прямой – 10.8 км, а по руслу рек – 14.6 км (коэффициент извилистости k_t = 1.35). При скорости переполненного горного потока 5 – 7 м/с, это расстояние он пройдёт примерно за ⅔ часа. Однако, как уже упоминалось ранее, спутниковые фотоснимки (см. рис. 3) показывают, что на рассматриваемых участках рек существовали области со следами прошедшего паводка. Это означает, что в ночь катастрофы здесь были обширные мелководные разливы, течение в которых замедлялось, поэтому период прохождения любых возмущений до Крымска увеличивался и, скорее всего, этот «мощный подъем воды» дошел до расчетной точки на повороте Адагума в Крымске как раз к 3 часам ночи.

На крутом повороте реке Неберджай прорвало насыпь у моста, находящегося примерно в 13 км от расчетной точки, см. на рис. 9 фотографию из источника [18]. При этом были неизбежны резкие колебания расхода воды в этой реке, дающей примерно 40 % расхода Адагума перед Крымском. Когда это произошло, авторам данной работы неизвестно. Происходили периодические сбросы из Неберджайского водохранилища через шахтный водосброс, и расход в них мог достигать примерно 100 $м^3/с$ [24], что составляет порядка 5 % от максимального расхода Адагума в ночь катастрофы.

Рис. 9

Так что заметные колебания уровня реки Адагум периодически происходили. Наиболее сильным, по-видимому, был тот, что был замечен на Баканке у ее притока Барабашки около 2 часов ночи. Эти колебания возникали на расстояниях около 10 – 15 км от расчетной точки, и им требовалось время порядка часа, чтобы дойти до нее. При этом даже если они были достаточно интенсивными в момент зарождения, далее, как будет показано ниже, они неизбежно должны были «расплыться» по водной поверхности.

V. Основные свойства волн на «мелкой воде»

О том что «по городу» прошла волна высотой в «6 – 7 метров», говорить и писать стали сразу же после катастрофы, см. например, [25, 26]. Начались поиски источника такой волны в виде прорыва плотин водохранилищ, построенных в предыдущие десятилетия, или образовавшихся из завалов автотранспорта и/или мусора под различными мостами в ночь катастрофы. Но, после того как все более-менее крупные водохранилища над Крымском оказались с неплохо сохранившимися плотинами и без работоспособных мощных водосбросов, а завалы автотранспорта (за исключением нескольких машин, снесенных потоком в ущельях, см. рис 9) не были найдены, стали вообще отрицать какие-либо заметные резкие колебания уровня воды. Частичный завал прохода под мостом в самом центре Крымска был, однако все жертвы на левом берегу из первого пятна смерти утонули заметно выше этого моста, см. рис. 1. Это означает, что примерно ⅔ жертв – жители левобережной стороны Крымска утонули там, где, казалось бы, утонуть было почти невозможно. И объяснить это банальным запруживанием реки нельзя.

Если не допускать предположения о том, что десяткам людей в ночь наводнения именно в прямоугольнике площадью примерно в полтора квадратных километра левобережья Крымска, то есть в первом пятне смерти, одновременно пришла мысль о суициде, остается признать, что там произошло то, что можно объяснить только сильными движениями поверхности воды, то есть достаточно высокой волной или волнами. В то же время на правобережье глубина затопления в особо пострадавших районах, то есть во втором пятне смерти, была на 1.5 – 2.5 м больше, так что там человеку малому или старому, слабому, сонному, находящему в неадекватном состоянии или оказавшемуся в несчастливых обстоятельствах легко можно было погибнуть и при отсутствии каких-либо волн.

В связи с вышеизложенным, рассмотрим основные свойства волн на «мелкой воде», то есть волн с длинами много бóльшими, чем глубина слоя воды, по поверхности которой они распространяются. Может быть, с их помощью мы сможем разрешить все противоречия, накопившиеся в этом рассмотрении.

Скорость v_0 движения такой волны малой высоты с амплитудой много меньшей глубины воды вычисляется по очень простой формуле [27]:

$$v_0 = \sqrt{gH}, \qquad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, а H – глубина слоя воды. Когда высота волны h становится соизмеримой с глубиной воды H, формула для скорости волны несколько усложняется:

$$v = \sqrt{gH\left(1+\frac{h}{H}\right)\left(1+\frac{h}{2H}\right)} \qquad (2)$$

Легко увидеть, что формула (2) для той же глубины H приводит к бóльшим значениям скорости, чем формула (1). Поэтому, малые возмущения перед фронтом интенсивной волны не могут от нее оторваться, убегая от нее вперед. В то же время вода за фронтом такой нелинейной волны тоже начинает двигаться, увеличивается из-за роста общей глубины водяного слоя и скорость малых возмущений. В итоге за фронтом интенсивной волны возмущения догоняют его, увеличивая его крутизну, и такая нелинейная волна оказывается волной ударной, в чем-то подобной, видимо, более известным ударным волнам в газе. Волна такого типа может возникнуть на реке, и тогда ее, обычно, принято называть бором [27]. Источником возникновения бора обычно являются приливы.

Опыт показывает, что формула (2) справедлива только до тех пор, пока величина h не превышает 3/5 от H. Если это отношение становится больше, то на фронте волны происходят интенсивные пульсации, уносящие от него энергию, и в формуле (2) вместо отношения h/H нужно оставлять коэффициент 3/5. На рис. 10 из источника [28] демонстрируется именно эта смена механизма рассеивания энергии на фронте бора в зависимости от отношения h/H. Глубина воды в середине английской реки Северн (в левой части фотографии) равна примерно 2 м, а справа – мелководье. Видно резкое качественное изменение характера поведения воды на фронте бора при уменьшении глубины.

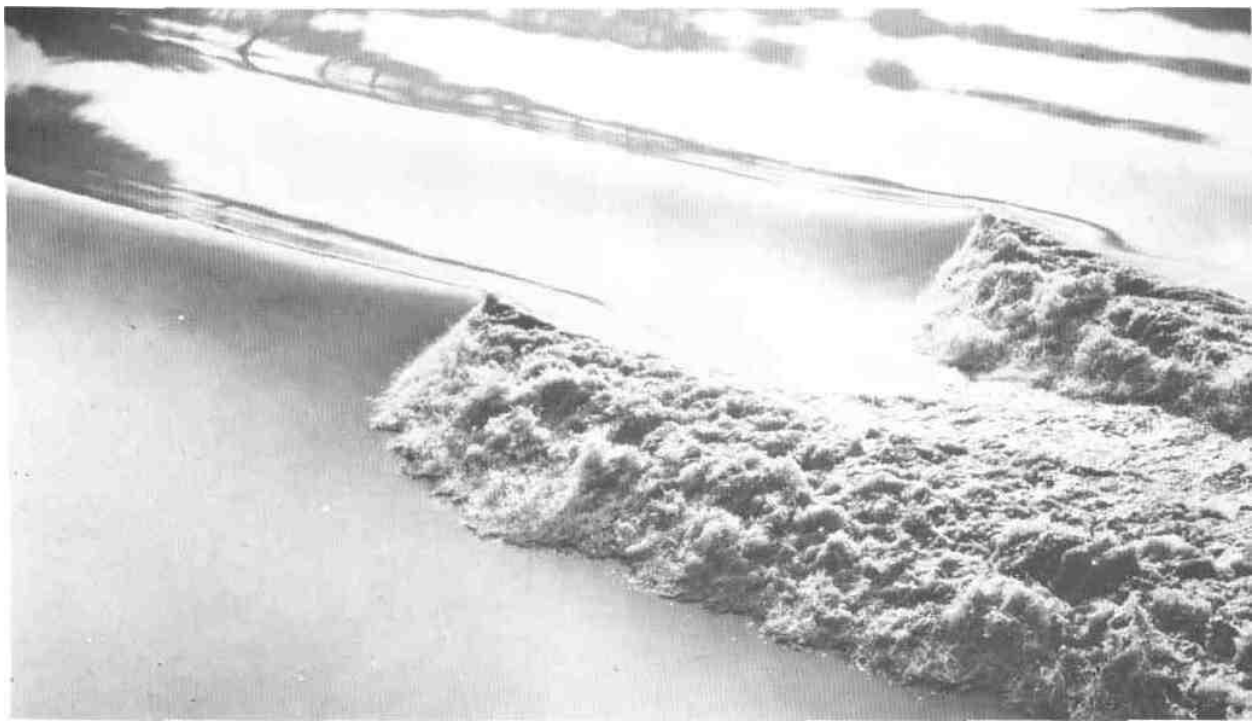

Рис. 10

Тогда при движении высокой волны по мелководью, то есть при h/H >> 1 формула (2) переходит в следующее выражение:

$$v = \sqrt{\frac{4gh}{5}} \qquad (3)$$

Формулы (1) – (3) могут быть использованы для описания движения волн на свободной поверхности неподвижной воды или любой другой жидкости. Если же вода движется с постоянной скоростью, а глубина ее слоя неизменна, то в неподвижной системе координат к скорости волны надо прибавить скорость потока, и больше никаких изменений в модели явления не потребуется. Однако, на реке глубина изменяется, а скорости потока в середине реки на быстрине и у берега сильно различаются. При этом речная ударная волна – бор устойчив только тогда, когда его фронт в плане прямолинеен. Кратковременные отклонения от прямолинейности из-за резкого изменения глубины возможны, но это не может продолжаться долго. Данное обстоятельство означает, что скорость фронта бора относительно берега реки должна быть везде одинакова. Обычно глубина реки на ее середине превышает высоту бора, поэтому скорость даже малых волн (см. формулу (1)) оказывается больше, чем скорость фронта бора у самого берега (см. формулу (3)). Устойчивость, а, значит, и само существование бора в этих условиях может обеспечиваться только встречным течением реки, компенсирующим бóльшую скорость его распространения относительно воды на середине реки. При этом, как правило, даже при этих обстоятельствах там, на глубине, высота бора мала. Это хорошо видно, например, на видеоролике, демонстрирующем серфинг на переднем фронте бора на той же самой реке Северн [29]. Из этого рассмотрения, в частности следует, что волны такого типа не могут двигаться вниз по течению реки, тем более горной и быстрой. В такой ситуации невозможно получить устойчивый прямолинейный фронт ударной волны. Но на мелководьях с медленным течением воды возможно возникновения подобных ударных волн под действием внешних достаточно сильных возмущений.

VI. Механизмы затопления Крымска

После проделанной в разделах I – V данной статьи работы механизм затопления с многочисленными жертвами возвышенного левого берега реки Адагум в городе Крымске становится вполне прозрачным. Возникшее выше в горах значительное возмущение свободной поверхности воды вышло на мелководье, образовавшееся после предварительного затопления прибрежной части левобережья Адагума, причем произошло это на крутом повороте реки – достаточно длинный и не слишком высокий «водяной горб» не последовал за изгибом русла, а продолжил прямолинейное движение, скользя по затопленному участку местности. Этим он вызвал на поверхности медленно текущего, в основном вширь, то есть поперек движению горба, слоя воды толщиной в 0.5 – 1 м ударную волну типа бора, которая привела там к быстрому

и резкому кратковременному возрастанию уровня воды. Волна, имевшая крутой и близкий к прямолинейному в плане фронт, прошла между затопленным руслом Адагума справа, где она исчезала из-за большой глубины воды, и границей мелководья, накрыла территорию левобережного пятна смерти и привела к гибели примерно ⅔ от всех погибших жителей Крымска. При этом нужно помнить, что в 3 часа ночи 7 июля граница мелководья могла проходить несколько ближе к реке, чем к моменту полного завершения затопления города, или несколько дней спустя, что было зафиксировано на рис. 2.

Следует отметить, что, судя по спутниковым фотографиям из Гугла, на этом изгибе реки имеется понижение левого берега и незастроенный, а, значит, пониженный узкий участок местности, как бы продолжающий русло Адагума. Весьма вероятно, что именно так когда-то пролегало его русло, см. рис. 11.

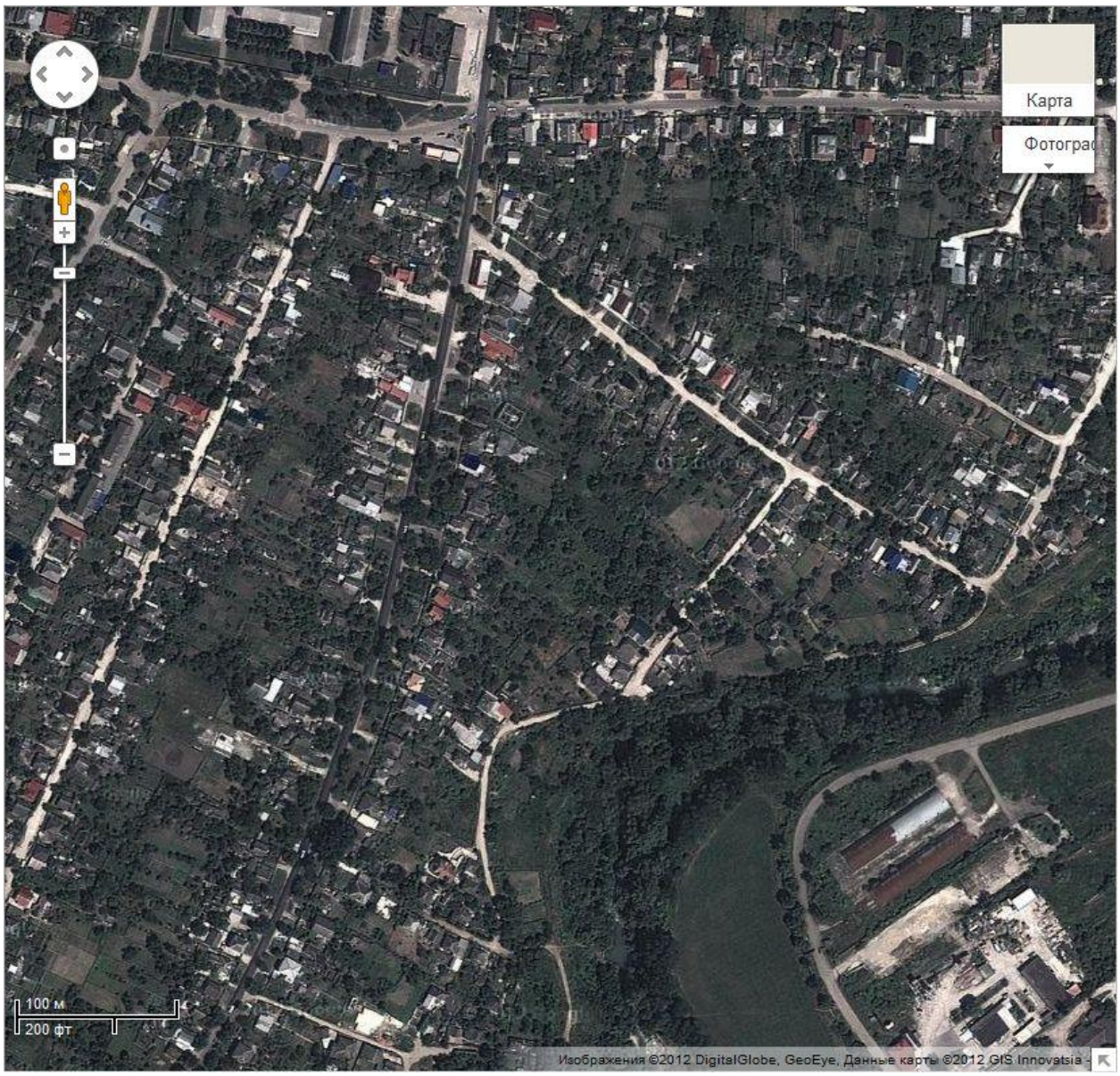

Рис. 11

Стоит также еще раз упомянуть и то, что автодорожный мост, и другие транспортные сооружения при входе реки Адагум в город Крымск, в целом оказались вполне отвечающие условиям даже катастрофического наводнения, произошедшего 7 июля 2012 года. Не они создали условия, которые привели к беспрецедентным для этих мест жертвам. Из этого следует, что повышенное внимание к этим сооружениям, с попытками объяснить их «конструктивными недостатками» затопление, произошедшее ниже по течению реки, совершенно неоправданны. Эти попытки мешают осмыслению подлинных причин наводнения в Крымске, и могут привести к тому, что необходимые инженерные работы по защите города от возможных повторных наводнений той же природы так и не будут в полной мере проведены.

Можно провести приближенные аналогии между возникновением ударной волны на мелководье и полетом со сверхзвуковой скоростью твердого тела в газе, см. рис. 12, где такой процесс показан при числе Маха, то есть при отношении скорости полета тела u к скорости звука c, $M = u/c \approx 1.5$. Качественными отличиями этих двух процессов является то, что:

1. В газе возникает трехмерное течение, а на поверхности воды оно практически двумерное.
2. Фронт ударной волны на поверхности воды – прямолинейный (см. рис. 10), а в газе – изогнутый (см. рис. 12).
3. В газе возмущения вносит твердое тело, а на поверхности воды возмущающим объектом оказался достаточно резкий и мощный подъем воды, вызванный быстрым изменением условий в горных ущельях выше по реке

Однако, выдув сверхзвуковой струи газа приведет к картине образования ударной волны, качественно похожей на ту, что изображена на рис. 12. А быстрые изменения условий в горах могли возникнуть в результате кратковременного и резкого усиления дождя, прорыва образовавшихся на притоках Адагума плотин на притоках из нанесенного потоком мусора, возможного перелива воды из небольшого водохранилища в Чубуковой щели или прорыва насыпи вблизи моста через реку Неберджай.

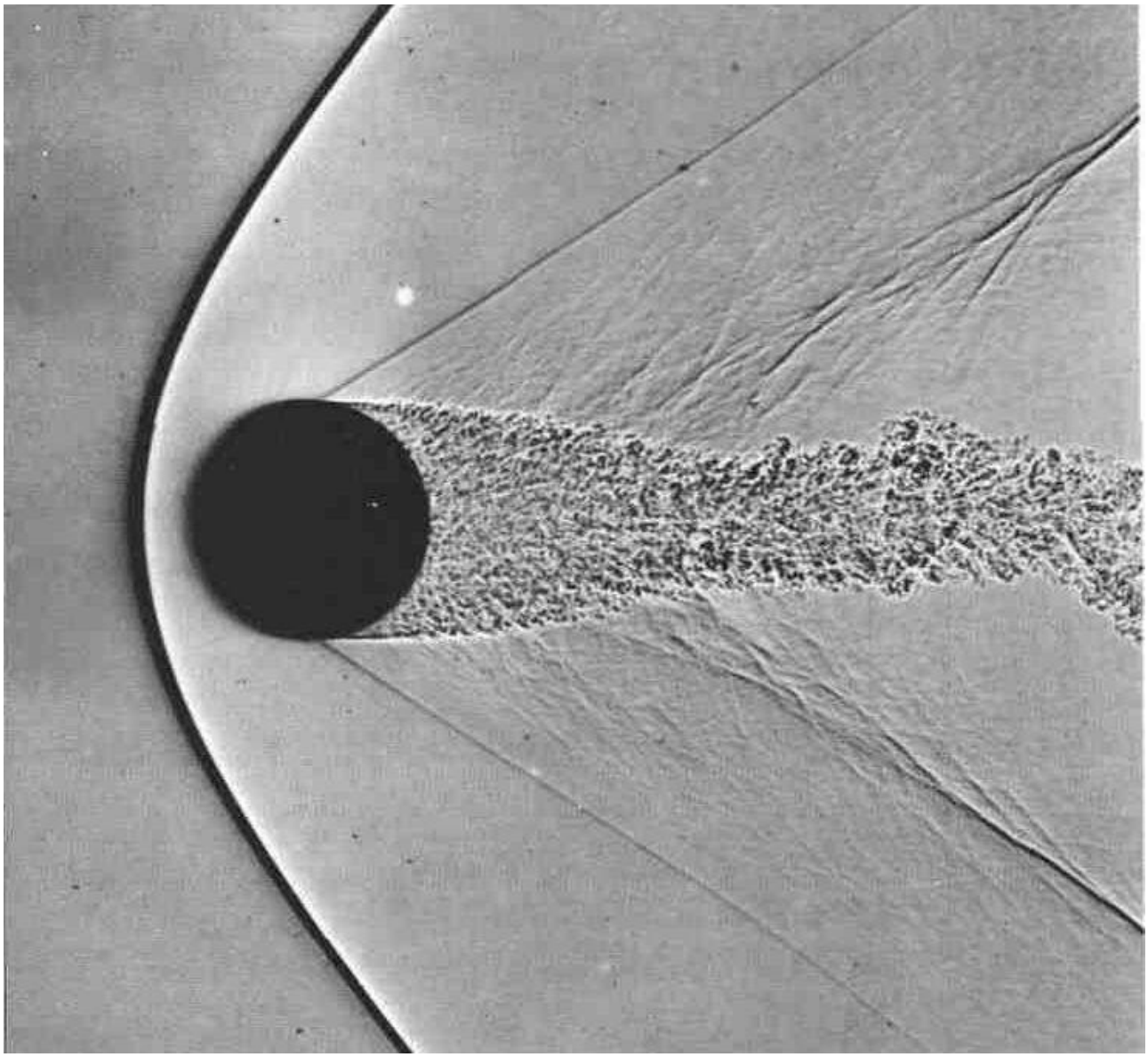

Рис. 12

Нетрудно теперь определить и основные параметры волны-убийцы. Скорость потока воды u при большом расходе в сечении 2 долины реки оценивалась величиной 4.5 м/с, а в окрестности шоссейного моста, расположенного приблизительно на таком же расстоянии от расчетной точки, как и сечение 2, но выше по реке, – 5 м/с. Кроме того, увеличение расхода приводит к возрастанию скорости. Поэтому вполне

можно оценить скорость движения этого водяного горба в расчетной точке относительно берега минимум в 5 м/с. При продольной скорости потока на мелководье 0 – 0.5 м/с водяной горб двигался относительно воды со скоростью u = 4.5 – 5 м/с. Скорость малого возмущения на мелководье v_0 глубиной h = 0.5 – 1 м составит 2 – 3 м/с (см. формулу (1)), так что отношение u/v_0 (аналог числа Маха в газе, M = u/c) будет не менее чем 1.5 – 2. Это означает, что этот пусть и достаточно сильно расплывшийся по поверхности воды горб может создавать ударную волну. Ее скорость v равна скорости возмущения u. Тогда из формулы (3) следует, что высота ударной волны на очень мелкой воде определяется следующим образом:

$$h = \frac{5u^2}{4g},$$

и величина h оказывается равной 2.6 – 3.2 м. С учетом толщины самого мелководья, глубина затопления при прохождении волны по левобережному пятну смерти вполне могла быть больше 3.5 м, а превышение ее гребня над обычным уровнем реки составляло около 11 м.

Пока кинетическая энергия горба воды не была израсходована на создание и движение ударной волны через препятствия на ее пути, эта волна продолжала движения, примерно как бор на реке Амазонке (называемый местными жителями пороpока), высота которого достигает 4 м, см. рис. 13 из источника [30]. А минут через 6, после исчерпания его энергии, крымская пороpока рассыпалась, и смерти на левобережье Адагума прекратились.

Рис. 13

Обычно, перед разрушением волна имеет наибольшую высоту и крутизну. Видимо, этим и объясняется скопление точек на финишной границе левобережного пятна смерти на рис. 1.

Спустя полгода после того, как были написаны эти строки, один из читателей первого издания этой статьи указал на панорамную фотографию территории Крымска на левом берегу реки Адагум, сделанную вскоре после катастрофы [31]. На ней видно, что все окна в домах как первого этажа, так и мансард – темные в правой части фотографии, а слева за некоторой линией – светлые. Это означает, что до этой линии стекла в окнах отсутствуют, а за ней – остались. Если сопоставить рисунки 1 и 14, легко убедиться, что описываемая здесь линия и задняя граница левобережного пятна смерти прекрасно согласуются между собой. Вряд ли данный факт можно считать чем-то удивительным. Пока волна-убийца захлестывала дома, выдавливая оконные стекла и на короткое время затапливая комнаты до потолка, были и жертвы. Как только

волна разрушилась, смерти прекратились, а окна остались целыми из-за сравнительно низкого уровня «квазистационарного», то есть довольно медленного затопления.

Рис. 14

Но в правобережье смерти на тот момент должны были только начинаться. Эта часть жителей Крымска погибла, оказавшись затопленной на правом берегу реки в наиболее низком обжитом месте правобережья и на малом пятачке уже понизившегося левого берега, чуть ниже правобережной зоны затопления. При этом очевидно, сыграло свою роль и то, что проем под мостом в центре города, на правой границе второго пятна смерти, был в частично перекрыт вырванными потоком воды стволами деревьев, кустарником и другим мусором (см. рис. 15 из источника [32]). Это спровоцировало перенаправления потока из русла в расположенную справа от реки низину. Именно ниже этого моста расположилось большинство точек, показывающие адреса проживания погибших во втором пятне смерти, см. рис. 1. При этом вдвое более широкий проем под автомобильным мостом на входе в город, как следует из фотографий на рис. 6, 7, оказался практически свободен от всего этого мусора. Так что можно предположить, что мусор в очень большой степени был захвачен потоком уже в самом городе в заросшей и нечищеной долине реки, с уменьшающимися уклонами, и изобилующей излучинами. Рис. 6, 7 и 15 наглядно показывают, какой из мостов в городе Крымске должен быть реконструирован, в то время как общественное внимание направляется к совершенно другому мосту, возможно потому, что эти мосты иногда просто путают.

Рис. 15

Изложенное здесь вполне объясняет, почему в большей части Крымска признаков прохождения волны очевидцами и в ходе работ по ликвидации последствий наводнения не зафиксировано. В то же время объяснена реакция части потрясенных жителей, которые категорически отказывались верить в то, что выше по течению реки не были разрушены плотины водохранилищ. Таким образом, якобы противоречащие друг другу свидетельства очевидцев, гидрологические данные и картина обнаруженных после спада воды разрушений складываются в единую самосогласованную картину.

Выводы

1. Беспрецедентно интенсивные дожди, выпавшие на Кубани 6 – 7 августа 2012 привели к аномально высоким стокам по руслам рек и ручьев, текущих по водосборной территории реки Адагум, на берегах которой расположен город Крымск, наиболее пострадавший во время наводнения.
2. Примерно к 3 часам ночи после разлива реки и подъема ее уровня на 7 – 8 м, были затоплены прибрежные районы города, левобережный – на глубину 0.5 – 1 м, и правобережный – на 1.5 – 2 м бóльшую.
3. В это время по реке до города дошло очередное, самое большое за ночь и относительно кратковременное увеличение расхода воды, на крутом повороте Адагума продолжившее свое движение не по руслу реки, а по прямой, через возникшее на левом берегу мелководье.
4. Это локальное возмущение уровня свободной поверхности воды создало на прибрежном мелководье ударную волну типа бора с крутым прямолинейным в плане передним фронтом, и высотой гребня над невозмущенным уровнем воды около 3 м.
5. Волна двигалась по затопленной территории со скоростью около 5 м/с, и примерно через 6 минут разрушилась, пройдя около 1.8 км. Разрушение волны произошло после исчерпания импульса и энергии создававшего ее локального «горба» на поверхности воды. Это явление и привело к возникновению левобережного пятна смерти на карте Крымска.
6. Погибшие в правобережном «пятне смерти» оказались в низине, затопленной в результате аномально высокого паводка, усугубленного наличием балки, «разрезающей» правый берег реки, и частичным перекрытием проемов под мостами, прежде всего, под центральным мостом города, стволами деревьев, кустарником и прочим мусором, собранным потоком, по-видимому, в основном в речной долине на городской территории.

Ссылки

1. Прокуратура назвала число погибших в результате наводнения на Кубани. *Интерфакс*, 26.07.2012 // http://www.interfax.ru/news.asp?id=257565
2. Официальный сайт оперативного штаба по ликвидации последствий в городе Крымск, 26.07.2012 // http://krymsk2012.ru/live/
3. Ю. В. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов – Катастрофические наводнения XXI века: уроки и выводы. Москва, «ДЭКС-Пресс», 2003 // http://www.mchs.gov.ru/mchs/library/29.PDF
4. Наводнению в Крымске способствовали не только рекордные ливни, но и антропогенный фактор – Росгидромет. *ИТАР-ТАСС*, 26.07.2012 // http://www.itar-tass.com/c387/481259.html
5. Данные поиска людей в Крымском районе. СпасПоиск, 27.07.2012 // http://spaspoisk.ru/find#.UA5xGWFM-g4
6. Группировка Минобороны РФ расчистит от завалов половину Крымска. *РИА-Новости*, 17.07.2012 // http://ria.ru/society/20120717/701628989.html
7. А. Бабченко – Крымск. Десять дней после трагедии. Часть 1. Муляка. *Блог*, 25.07.2012 // http://starshinazapasa.livejournal.com/431580.html#cutid1http://starshinazapasa.livejournal.com/431580.html#cutid1
8. Е. Мерцалова – Крымск. Технический анализ произошедшего. *Хватит пилить Машук!* 14.07.2012 // http://spatrol.livejournal.com/11742.html
9. Опубликованы спутниковые карты-схемы на территорию г. Крымска. Последствия наводнения. *ИТЦ «Сканэкс», Пресс-центр.* 23.07.2012 // http://press.scanex.ru/index.php/ru/component/k2/item/2452-krymsk
10. 07.07.2012: О катастрофических дождях на черноморском побережье Краснодарского края – анализ ситуации. *Гидрометцентр России* // http://www.meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/5419-07072012-
11. Поиск по данным государственного водного реестра // http://textual.ru/gvr/
12. Д. Л. Соколовский – Речной сток. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1968.
13. Причиной катастрофы в Крымске стали экстремальные осадки и антропогенные факторы – доклад. *РИА Новости, Южный округ,* 02.08.2012 // http://ug.ria.ru/incidents/20120802/82296980.html
14. Ученые: Причиной затопления Крымска стала бесконтрольная застройка местности. *Портал Южного региона*, 09.07.2012 // http://www.yuga.ru/news/267039/
15. Оперативная космическая съемка районов наводнения в Краснодарском крае. *ИТЦ «Сканэкс», Пресс-центр.* 13.07.2012 // http://press.scanex.ru/index.php/ru/component/k2/item/2437-krasnodarsky_kray_monitoring
16. С. Евсюков – Наводнение 2012: Крымск (фоторепортаж). *Блог*, 08.07.2012 // http://sergio-zevs.blogspot.com/2012/07/2012-2012-russia-flood.html
17. Ю. Теплых – Снимки из космоса прояснили природу наводнения в Крымске. *АиФ Украина*, 13.07.2012 // http://www.aif.ua/society/news/50142
18. С. Газарян – Крымск: будет ли «вторая волна»? *Блог*, 09.07.2012 // http://gazaryan-suren.livejournal.com/92183.html\
19. ЮГА, портал Южного региона // http://www.yuga.ru/media/krymsk_navodnenie_b06.jpg
20. Яндекс. Картинки // http://im5-tub-ru.yandex.net/i?id=600462740-06-72&n=21
21. Наглядное подтверждение рукотворного цунами в Крымске. *Блог*, 08.07.2012 // http://svobodoff.livejournal.com/112982.html
22. Откуда пришла вода в станицу Нижнебаканскую. *Экологическая вахта по Северному Кавказу*, 14.07.2012 // http://www.ewnc.org/node/9417
23. Е. Титов – Откуда шла волна. *Новая газета*, N 86, 03.08.2012 // http://www.novayagazeta.ru/society/53828.html
24. А. Сорокин – Виктор Волосухин: Сброс из Неберджаевского – был. Но не это стало причиной трагедии. *Новая газета*, N 81, 23.07.2012 // http://www.novayagazeta.ru/politics/53659.html
25. Наводнение в Крымске – сильнейшее за последние 150 лет. *Вести–Кубань,* 08.07.2012 // http://www.youtube.com/watch?v=61Bttr1ogXg&feature=player_detailpage
26. В. Битук – Семиметровую волну в Крымске наблюдали очевидцы. *Вести FM*, 10.07.2012 // http://www.radiovesti.ru/articles/2012-07-10/fm/57011
27. Б. Б. Кадомцев, В. И. Рыдник – Волны вокруг нас. Москва, «Знание», 1981.
28. М. Ван-Дайк и др. Альбом течений жидкости и газа. Москва, «Мир», 1986 // http://www.imec.msu.ru/content/nio/VanDaik/vd_main.html
29. Incredible Severn Bore Wave. Видео, *Sky News*, 2010 // http://www.youtube.com/watch?v=IKA39LQOIck&feature=player_embedded#!
30. Семь удивительных природных феноменов. *Scriru* // http://www.scriru.com/7/61795896637.php
31. Яндекс. Картинки // http://freerutube.com/wp-content/uploads/2012/07/XAKPLl-on2I.jpg
32. Страшная трагедия на Кубани: почему так много погибших? *Комсомольская Правда*, 07.07.2012 // http://kp.ru/translation/flood_kuban/

Дата первого издания – 07.08.2012.

Дата второго издания – 03.02.2013.