УДК 556.182

ВЗАИМОСВЯЗАННОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЕДИНОЙ СИСТЕМЕ РЕЧНОГО ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА; ПРОЯВЛЕНИЕ В КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ЛИВНЕЙ В ВЫСОКОГОРНЫХ ОБЛАСТЯХ С РЕЗКОРАСЧЛЕНЕННЫМ ГОРНЫМ РЕЛЬЕФОМ (НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ СЕЛЕООБРАЗОВАНИЯ)

[1]Трифонова Т.А., [2]Аракелян М.М., [3]Аракелян С.М.

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, e-mail: tatrifon@mail.ru;
[2]Ереванский государственный университет, Ереван, e-mail: marakelyan@ysu.am;
[3]ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им.А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимир, e-mail: natmich3@mail.ru

В настоящей работе предлагается оригинальный подход для объяснения процессов образования и распространения селей в горных условиях в условиях резкого увеличения вовлекаемых в этот процесс водных масс. Нами предлагается модель, согласно которой необходимыми условиями возникновения селя являются следующие: наличие глубинного трещинообразования в русле горной реки, перепад высот, наличие пула водной массы (обычно, – над областью будущего возникновения селя), обеспечивающего необходимый перепад гидростатического давления, а также выпадение осадков в виде обильных дождей, тающих снегов в верховьях селеопасных рек, провоцирующих это явление. Одним из принципиальных базовых допущений, на котором строится наша модель и которое подтверждается наблюдениями селевых катастроф, является то, что объем/масса водного селевого выброса может существенно превосходить оцениваемое количество выпавших осадков на поверхности. В связи с этим естественное объяснение получает общеизвестный факт, что не все ливневые дожди приводят к катастрофическим последствиям. Сущность и новизна нашей модели заключается в том, что в селевом взрыве активно участвуют как поверхностные, так и подземные воды, т.е. речь идет о 3D-механизме формирования селя. При этом в русле создается определенный участок – ворота селя, где начинает идти интенсивная подземная подпитка водой (за счет перепада давлений) основного импульса селя. И этот процесс может играть доминирующую роль. Нами предлагается математическая модель рождения и распространения селя, в основе которой лежат представления нелинейной гидродинамики волновых процессов с формированием солитонов. В рамках развиваемой концепции в заключительном разделе 5 данной статьи приведен краткий анализ возможных причин произошедшего катастрофического наводнения в г. Крымске (июль 2012 г.).

Ключевые слова: сели, водные массы, катастрофы, солитоны, осадки, бассейн, горные реки

THE INTERRELATEDNESS OF SURFACE AND UNDERGROUND WATERS IN RIVER DRAINAGE BASIN; THE CATASTROPHIC EVENTS IN CONDITIONS OF INTENSE RAINS IN THE MOUNTAINOUS AREAS IN REZKORASČLENENNYM MOUNTAINOUS TERRAIN (BY THE EXAMPLE OF MODEL EDUCATION MUDFLOW)

[1]Trifonova T.A., [2]Arakelyan M.M., [3]Arakelyan S.M.

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: tatrifon@mail.ru;
[2]Yerevan state University, Yerevan, e-mail: marakelyan@ysu.am;
[3]Stoletov Vladimir state University, Vladimir, e-mail: natmich3@mail.ru

This paper suggests an original approach for explaining the processes of a mud flow formation and distribution in mountains under the great increase of water masses involved. We propose the model which provides the following conditions as the necessary ones: the availability of deep cracks in the mountain river bed, level difference, the availability of water mass pool (usually over the area of a future mud flow which provides a required hydrostatic pressure drop. One more condition is precipitation in the form of heavy rains, melting snow in the upper reaches of the rivers provoking mud flows. One of the fundamental assumptions which is the basis of our model and which is proved during the observation of mud flow catastrophes is that the volume/mass of water mud flow burst can considerably exceed the valued amount of precipitations deposited on the surface. As a result, a well-known fact receives a natural explanation, i.e. not all cloudbursts course disastrous consequences. The essence and the novelty of our model are the following: surface and ground water take an active part in the mud flow burst. So, we are speaking about 3D-mechanism of a mud flow formation. A certain area called a mud flow gate is being created in the river bed. This place is the origin of an intensive underground feeding of the mud flow pulse (due to the pressure drop). We suggest a mathematical model of the mud flow emergence and distribution based on the conception of non-linear hydrodynamics of wave processes with forming solitons. Within the framework of this conception we give a brief analysis of the possible reasons for the recent catastrophic flood in the town of Krimsk, Russia (July, 2012) in the final chapter of the paper.

Keywords: rurals, water masses, catastrophe, solitons, rainfall, swimming pool, mountain rivers

Получившие в последнее время большой общественный резонанс последствия чрезвычайных ситуаций – паводков, наводнений, селей, особенно приуроченных к горным территориям, создают видимость резкого усиления глобальных изменений,

происходящих в природе [1]. Однако, несмотря на такую заявляемую общность, при анализе ограничиваются обычно локальными особенностями ландшафта конкретной территории, где возникла чрезвычайная ситуация, и/или внезапно изменившимися погодными условиями (включая ливни, смерчи и др.). Иногда эти природные явления накладываются на результаты хозяйственной деятельности человека (искусственные водоемы, плотины, дороги и др.), и делаются выводы о причинах возникших катастроф как аддитивном наложении этих множественных факторов (см. напр. [2]). Более того, акцент обычно делается на анализе конкретных морфологических особенностей фракций, входящих в селевой поток, структуре почвенного покрова, физико-химических характеристиках пород, а также специфике тех или иных ландшафтов, результатах хозяйственной деятельности человека, но без комплексного системного подхода к проблеме с учетом фундаментальных основ и многофакторности данной задачи.

Поэтому ощущается явный недостаток научно-обоснованных подходов, объясняющих причины возникновения таких динамических ситуаций в едином комплексе взаимовлияния (т.е. принципиальной связи) различных процессов, что требует детального и более пристального изучения гидрологического режима водных объектов, причем, что особенно важно, – не только поверхностных, но и грунтовых, включая глубоко залегающие водные ресурсы. В связи с отмеченным, необходимо более тщательно изучить фундаментальные механизмы возникновения указанных чрезвычайных ситуаций и их функционирования с учетом взаимосвязи разных факторов.

В имеющейся литературе такие процессы как снежные лавины, оползни, сели и т.д. рассматриваются как аналогичные экзогенные процессы (см. напр. [3–5]). При этом привлекаются различные модели объяснения этих явлений, но единый комплексный подход к их возникновению фактически отсутствует.

В данной работе акцент сделан на установлении взаимосвязи обсуждаемых явлений в рамках единого бассейнового подхода к водным ресурсам с учетом фундаментальных физических процессов трещинообразования в объеме горного массива. Это направление нами развивается в течение уже длительного времени [6–10] и показало свою эффективность для ряда задач, в частности при исследовании динамики развития горных ландшафтов и литоводосборного бассейна.

1. Базовые принципы – комплексный подход на основе речного водного бассейна

В последнее время все большее значение придается пониманию того факта, что возникающие природные катастрофы являются следствием не случайных, внезапно сложившихся стечений обстоятельств, а основываются на фундаментальных закономерностях развития процессов, определяющих динамические сложные (нелинейные) системы, к которым относится земная кора во взаимодействии с атмосферными (и другими) факторами (ср. с [11]). Их плохая предсказуемость, считающаяся чуть ли непреодолимой проблемой из-за влияния независимых случайных событий [5], на самом деле определяется недостаточным пониманием взаимосвязанности фундаментальных причин, приводящих к этим катастрофическим природным явлениям (ср. с [8]).

Хотя данный подход является универсальным и верен для любых ландшафтов, но наиболее явно такая комплексность должна выявляться в высокогорных областях с резкорасчлененным горным рельефом, для которого характерны крутопадающие долины и локализованные русла горных рек с их водосборными воронками [7, 12].

Поэтому именно для этих объектов представляет интерес с единых позиций в рамках бассейнового подхода выявить базовые закономерности для объяснения таких природных явлений как сели и катастрофические наводнения, внезапно проявляющиеся в руслах горных рек. При этом общепринятая точка зрения, что их возникновение есть результат накопления рыхлых (склоновых и речных) отложений [3–5], их переувлажнения, которые особо опасны в условиях, например резкого паводка (интенсивные ливни, бурное снеготаяние и др.), является только внешним фактором проявления данных катастрофических явлений, не затрагивающим внутренние глобальные причины, определяющие развитие горного рельефа и его водосборного бассейна [6, 9, 10].

Действительно, хорошо известно, что, во-первых, сходные по своей морфологии соседние горные склоны, расположенные в одной местности при одних и тех же погодных условиях, кардинально отличаются по степени опасности в аспекте возникновения подобных явлений. Во-вторых, об-

щий объем воды, вовлеченной в эти явления, часто намного превосходит уровень выпавших осадков. В-третьих, не совсем понятно, почему именно вдоль русел малых рек распространяются катастрофические последствия (с удивительно высокой разрушительной одиночной волной), хотя поблизости обычно имеются и более мощные складки местности.

Предлагаемая концепция базируется на следующих базовых принципах.

Первое, существует тесная взаимосвязь поверхностных и подземных вод в данной конкретной местности. Вовлечение подземных вод в развитие катастрофических явлений является принципиальным пунктом, и в общем водном дебите этих явлений атмосферные осадки могут не быть доминирующим фактором, хотя и играют роль спускового механизма.

Второе, участие подземных вод в явлениях на поверхности зависит от единой структуры речного водного бассейна в данном ландшафте, включающего в себя как поверхностные речные русла, так и систему подземных водных горизонтов на разных глубинах. Рассмотрение причин возникновения явлений на поверхности должен включать в себя обязательный анализ подземной компоненты речного водного бассейна. В этом аспекте очень ценную информацию могут дать прямые измерения уровня подземных вод и величин гидростатического давления в разных их горизонтах, особенно до и после происшедшего катастрофического природного явления.

Третье, степень взаимосвязанности поверхностных и подземных вод и их совместное действие зависит от конкретного состояния трещиноватости и свойств трещиноватых – в рассматриваемом нами случае – горных пород, а в целом – геологической структуры массива местности, которая является динамической системой и подвержена непрерывным изменениям.

Геометрия, морфология и генезис трещин определяют характерные и потенциально опасные участки, в которых начинает развиваться катастрофическое явление при соответствующих, в т.ч. внешних, условиях. Сам прорыв подземных вод наружу может произойти в определенных локализованных местах, где по ряду причин изначально закрытый проход (например, забитый кусками пород) пробивается под действием экстремального гидростатического давления подземных вод, причины роста которого могут быть различными и комплексными.

Четвертое, разрушительные последствия развития рассматриваемых явлений, определяемые общей массой транспортируемого водного и каменного материала (грязекаменной массы) и темпом его роста по мере распространения водных потоков, в первую очередь зависят от неоднородности горных пород и общих физико-механических и динамических процессов деформации и разрушения твердых тел как на макро-, так и на микроуровнях (а не только определяются поверхностным состоянием пород, связываемым обычно с процессами выветривания и с другими, в т.ч. атмосферными, факторами). Эти инженерно-геологические свойства пород, с одной стороны, влияют на общую водопроницаемость пород и режимы движения подземных вод, а с другой стороны, – должны учитываться при планировании и строительстве гидротехнических и других искусственных водных объектов в данной местности.

Последний фактор может оказывать существенное влияние на развитие катастрофических явлений не только в случае их разрушения, но и через сложные процессы распределения (увеличения) дополнительно возникающего гидростатического давления в речном водосборном бассейне в целом (особенно, в системе подземных вод), определяя критические точки местности, в которых происходит прорыв водных потоков.

Пятое, наличие трещин в горной породе определяет не только собственно водный поток, идущий снизу (из внутреннего горного массива) – наверх (вынос на поверхность), но и твердую измельченную (в виде песка) массу. Последняя всегда возникает в случае соприкосновения твердых трущихся поверхностей. Этот эффект может провоцироваться и в результате действия различных динамических процессов – вибраций, имеющих как природную (естественную), так и техногенную причины.

Данный эффект, называемый тиксотропией, хорошо известен в геологии (особенно в условиях мерзлого грунта). Важно, что после прекращения вибраций процесс восстанавливается, и порода опять становится единым массивом. На практике этот эффект широко используется при изготовлении и транспортировке бетона, когда идет непрерывное перемешивание смеси, которая в таком динамическом режиме остается в жидкой фазе в виде взвеси.

Смешиваясь с водой, такая образовавшаяся грязевидная масса выносится наверх

под действием возрастающего (по ряду причин – см. ниже разделы 2,3) гидростатического давления в подземных водных горизонтах. Данная бетонообразная масса, действительно, часто обнаруживается в местах выноса породы при прорыве вод из трещин.

Ниже эти общие принципы рассмотрены в аспекте выявления механизмов их реализации в рамках соответствующих моделей и возможного проявления в конкретных условиях.

2. Связь русловых процессов горных рек с трещинообразованием горного массива

В ряде ранее опубликованных нами работ [9, 10] был предложен механизм формирования горного речного русла и литоводосборного бассейна. Принципиальное положение данной концепции заключается в том, что речные/русловые трещины закладываются в горной породе как результат релаксации накапливающихся в ней напряжений; они начинают свое развитие от водоприемника (устья) по склону к источнику («снизу-наверх»). На конце такой трещины образуется зона напряжения и формируется водосборная воронка округлой формы (локальная зона бифуркации русла или возможного истока реки).

Важным фактом является то, что образующаяся в породе трещина распространяется не только по поверхности, но достигает и больших глубин (в сотни и более метров) [11–13]. В зону трещины стягиваются подземные воды; механизм этого 3D-процесса связан с действием внутреннего (глубинного) давления, а также капиллярных сил. В результате происходит резкий подъем подземных вод к поверхности. Именно эти воды являются базовыми для формирования бассейна рек и оказывают постоянное влияние на функционирование водной системы реки [7].

Поверхностный сток представляет другую, непостоянную, компоненту водного баланса и, действительно, зависит, главным образом, от климатических условий, но не является доминирующим фактором в общем объеме высвобождающихся вод при возникновении чрезвычайной ситуации. Если в обычных условиях русловая трещина не глубока и не достигает подземных вод, она все равно может развиваться в режиме «сухого русла», которое может сильно трансформироваться при наличии внешних факторов, – например, при землетрясении даже небольшой силы и/или во время действия проявляющегося локального поверхностного (особенно, катастрофического) стока (в частности, из-за обильных дождей) – и оказывать существенное влияние на катастрофические процессы.

Рост русловых трещин, который происходит, естественно, непрерывно, особенно в горных условиях (но часто не принимается во внимание гидрогеологами), может приводить к существенному увеличению стока. Так, например, рост русла вверх по склону на 40–45 м в бассейне Сарезского озера (Памир, Таджикистан) – по некоторым оценкам более, чем в 1,5 раза – увеличил сток небольшой горной реки [14].

Как указывалось выше, и это вполне очевидно, – не все трещины порождают реки и/или выход подземных вод. Однако, здесь важен и обратный процесс – можно предполагать, что разломы (трещины) в земной коре являются путями пополнения подземных вод за счет поверхностного (дождевого) стока, в результате чего, в свою очередь, повышается давление в близлежащих (но территориально распределенных по большой площади водного бассейна) реках. Это является определяющей причиной, способствующей появлению или усилению селеопасной ситуации за счет обсуждаемого механизма с положительной обратной связью. Принципиально, что и искусственные водные объекты также оказывают аналогичное влияние через механизм влияния подземных вод из-за возникающего избыточного давления на поверхностные воды, расположенные на ближайших территориях в рамках одного водного бассейна (согласно гидростатическому закону Паскаля давление в водной среде, которая является несжимаемой, передается одинаково по всем направлениям [15]). Следствием этого является повышение давления в русле реки, т.е. создается единый наземно-подземный ресурсный источник воды. В условиях относительно равнинных рек это может резко усиливать наводнение, т.е. без учета подземного фактора часто не понятна причина возникновения мощных паводков, намного превышающих объемы воды, выпавшей на землю в виде осадков или таяния снега и ледников.

Очевидным условием действия этого механизма является необходимый перепад высот, создающий требуемую разность гидростатического давления (для подземных вод это реализуется по механизму аналогичному возникновению артезианских водных источников).

Однако, и нижележащие слои (первоначально, – изолированные) подземных вод, находящихся при избыточном давлении или высокой температуре, могут влиять на вышестоящие водные горизонты в случае внезапно возникшего их контакта (аналог возникновения гейзеров).

В связи с этим уже не кажется парадоксальным, когда водный объект (хранилище), находящееся ниже по высоте в горном рельефе, тем не менее может оказывать существенное воздействие на водные ресурсы вышестоящих территорий через соответствующий подъем водных масс в единой системе водного бассейна (своеобразный эффект «выдавливания») в случае резкого изменения внутреннего состояния горного массива (нарушение по разным причинам – природного и/или антропогенного характера – изолированности подземного водного объекта с повышенным давлением).

В любом случае без учета подземного фактора часто не понятна причина возникновения мощных паводков и/или селей, намного превышающих объемы воды, выпавшей на землю в виде осадков и/или таяния снега/ледников.

Данный системный фактор влияния подземных вод в этом случае выполняют роль спускового механизма, который вовлекает в процесс всю – огромную – массу подземных вод в рамках одного водного бассейна, благодаря возникающему внутри горного массива избыточному давлению, когда оно становится достаточным для установления единого ресурсного источника наземных и подземных вод за счет преодоления существующих блокирующих факторов (обычно, связанных с засорением трещин различными породами и/или из-за поверхностных причин, в т.ч. построенных сооружений в результате хозяйственной деятельности человека, включая и защитные объекты). Подобный прорыв, часто сопровождающийся выносом твердых пород на поверхность, определяет резко увеличивающуюся грязе-каменную составляющую катастрофического явления. Нелишне отметить, что сам по себе поверхностный сток воды не может приводить к массовому перемещению грунта – даже в бурных горных реках с большим объемом воды русловая каменно-почвенная структура является все же устойчивой и не может массово перемещаться только под напором поверхностных вод. С другой стороны, давление в подземных водах в несколько атмосфер способно выносить наверх массивные горные породы большого размера с достаточной глубины.

В природно-территориальном аспекте изменение подземного давления может быть связано, например, с активизацией вулканической или сейсмической деятельности. Этими же причинами может быть объяснен факт повышения дебита горных родников во время землетрясений, что, несомненно, указывает на то, что во время сейсмической активности русловые трещины находятся в динамике и существенно изменяют свою топологию. Данный факт может обуславливать кардинальное изменение (увеличение) водного режима всего водного бассейна реки за счет вовлечения глубинных вод.

Далее, немаловажным фактором в рамках рассматриваемого подхода является принципиальная ясность в определении исходного места возможного схода селя – на конце трещины в зоне напряжений, где формируется водосборная воронка, при выполнении определенных условий. В традиционной трактовке, когда зарождение селя связывается только с ливневыми осадками, прогнозное фиксирование места зарождения селя является загадкой.

3. Теоретические основы модели формирования горного селя – качественное рассмотрение

В этом разделе на примере возникновения горных селей сделана попытка интерпретировать геодинамические процессы в горах в аспекте учета генезиса и механизма образования горных речных русловых систем.

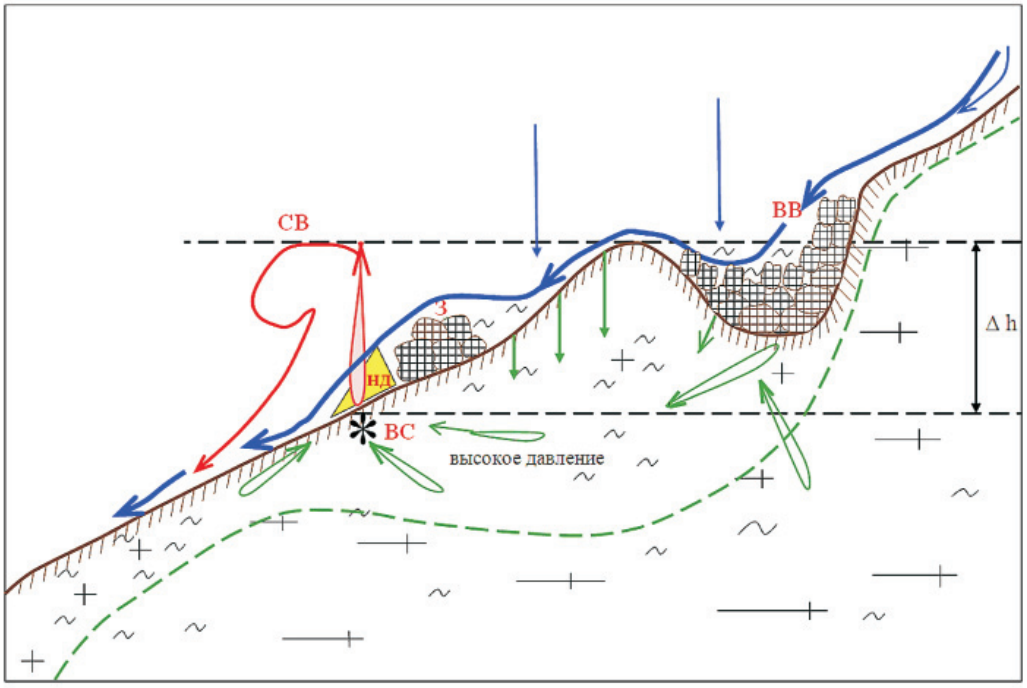
Обобщая определения селя, имеющиеся в литературе [5, 16], можно констатировать следующее. Сель – грязевой или грязекаменный поток (трехмерное образование) с очень большой концентрацией минеральных частиц, камней и обломков горных пород (от 10–15 до 75% объема потока), внезапно формирующийся в руслах горных рек и вызванный – по временной шкале, – как правило, ливневыми осадками, реже интенсивным таянием снегов, а также прорывом моренных и завальных озер, обвалом, оползнем, землетрясением. Методов прогноза образования селей на конкретной территории в **определенный момент времени** в настоящее время не существует [5].

По-видимому, такой прогноз – не решаемая задача на сегодняшний день, но выяснение ключевых факторов селеобразования в едином комплексе и определение потенциально опасных мест их зарождения – необходимый этап изучения данной проблемы. В настоящем разделе мы рассмотрим эти вопросы.

Нами предлагается следующий механизм образования и развития селя.

Возникновение селей предполагает обязательное наличие русловой трещины. В верховьях горных рек, где «молодые» трещины еще слабо раскрыты и находятся в стадии формирования, режим подъема воды к поверхности из глубин по системе трещин недостаточно сформирован. Однако, постоянно имеют место процессы разрушения породы в главной русловой трещине и в близлежащих трещинах. В сезон дождей происходит усиление взаимодействия поверхностного и подземного стоков; поэтому наблюдается резкое увеличение объема воды в прирусловой области. Но, поскольку сама русловая трещина забита сверху и внутри различными породами и обломочным материалом, отличающимися по механическому составу, то до определенного момента времени сохраняется стабильность функционирования руслового водного потока.

Особое внимание для дальнейшего сценария развития ситуации следует обратить на состояние вышележащего (по отношению к месту возникновения будущего селя) водного бассейна, который может быть представлен в виде либо водосборной воронки, либо водохранилища, либо затора на русле (рис. 1). Резкое увеличение в данной области объема воды приводит к увеличению гидростатического давления, передаваемого по консолидированной водной системе подземных под. В условиях горной долины водные потоки (как поверхностные, так и внутренние) направлены исключительно в сторону русла. Степень воздействия увеличения давления на формирование селя обусловлено также градиентом высот наклонной плоскости. Складывающаяся ситуация приводит к возникновению, уже упоминавшегося, эффекта артезианской скважины. Другими словами, давление в водосборной воронке способствует тому, что подземные водные массы, скопившиеся в приповерхностной области русла реки (в соответствии с топологией трещинообразования в горном массиве), находят слабое место, по которому вырываются на поверхность. Это и фиксирует место зарождения селя. Назовем эту область русла «воротами селя» (показано на рис. 1).



* **ВС** – «ворота селя»
ВВ – водосборная воронка
З – затор
нд – низкое давление
Δ h – перепад высот (гидростатическое давление)
→ – поверхностные воды
⟹ – подземные и просачивающиеся со склонов воды
СВ – селевая волна

Рис. 1. Схематическое представление развития селя в зоне «ворот селя»

Высота вырвавшегося потока (принято называть его селевой волной) определяется, главным образом, разностью давлений между местом излияния потока (определяется внутренними напряжениями в породе) и поверхностным давлением (определяется

внешними причинами – в основном вышележащим водоемом). После вырывания селевого потока вверх на поверхность возникшее в воротах селя низкое давление (по гидродинамическому закону Бернулли, чем выше скорость выброса масс воды, тем сильнее понижается давление [15]) способствует вовлечению дополнительных масс воды и различного твердого обломочного материала, т.е. процесс усиливается за счет такой «положительной обратной связи». Это в свою очередь приводит к еще большей интенсивности процесса – возникает лавинообразный механизм увеличения вовлеченных в процесс водных потоков. В результате такого «усилительного» механизма образуется смесь воды с мелкоземом при различной концентрации камней (смесь воды, гальки, гравия, небольших камней и т.д.).

Появление спровоцированной данным механизмом области низкого давления определяет зону аттрактора, в которую вовлекаются дополнительные подземные воды, которые в обычной ситуации оставались бы пассивными. Этим объясняется уже упоминавшийся принципиальный факт, что при катастрофических наводнениях обычно наблюдается существенное превышение массы выплескиваемой воды по сравнению с количеством выпавших осадков. Естественно, что место и интенсивность возникновения такого фонтанного взрыва зависит от конкретного строения горного массива и его водных горизонтов. Без дополнительных предварительных исследований и анализа этих факторов, действительно, прогноз и анализ рисков затруднителен. Поэтому общепринято считать, что появление селя, как правило, характеризуется внезапностью по времени и неопределенностью по месту.

Оползни и лавины в такой интерпретации нельзя отождествлять с селем, поскольку там нет внутренней подпитки деятельного водного потока.

Проведенное нами обсуждение позволяет классифицировать возможные места зарождения селя и оценить степень риска конкретных территорий.

Становится также очевидным, что процесс носит пороговый характер и определяется конкуренцией внутренних (в массиве породы) процессов и поверхностных явлений в рамках единого бассейна реки. Существование порога – характерный признак нелинейного динамического процесса взрывного характера [17, 18], и отличает катастрофический процесс от вялотекущего, не представляющего особую опасность.

Еще раз подчеркнем, что с поверхностными явлениями обычно связывают влияние вышележащего водоема, но оно может быть различным: он, с одной стороны, может выступать в роли водонапора, усиливающего давление при дополнительном поступлении воды «сверху-вниз» из-за очевидной разницы соответствующих потенциальных энергий. С другой стороны, обломочный материал, образующийся в русле и в водосборной воронке, освобождается из-за избыточного давления и транспортируется поступающей сверху водой вниз по руслу, аддитивно усиливая мощность селевого потока. Влияние подземных вод, на котором мы акцентируем внимание, ведет к резкому – мультипликативному – усилению процесса.

В результате схода селя русло реки прочищается и, возможно, расширяется, т.е. селевый процесс можно считать естественной закономерностью – своеобразной природной «санитарной процедурой» в режиме непрерывного функционирования горного русла реки, и он должен неоднократно (возможно, квазипериодически) повторяться во времени с чередующими периодами относительного «затишья», когда устанавливается динамическое равновесие в фиксированных на данный момент времени условиях существования русла реки, понимаемого в широком смысле как субъекта единого бассейна поверхностных и подземных вод. Но эта повторяемость процесса не является в истинном смысле периодической, поскольку зависит от постоянно меняющегося баланса разных факторов, доминирующих в зависимости от конкретной ситуации в общем процессе развития селя.

Поскольку в селевой волне имеет место распределение взвешенных частиц как по высоте (наиболее тяжелые частицы оказываются внизу и движутся вследствие наличия силы трения медленнее, чем более легкие и расположенные выше), так и по продольной координате распространения (зависит от рельефа местности и морфологии руслового стока – наличия в русле различных пород и преград), то со временем развивается важный эффект – локализация объема воды в определенных местах, сопровождающаяся процессом опрокидывания волны. Данное явление характерно для нелинейного процесса с распределением скоростей водного потока по пространственным координатам. Это приводит в момент столкновения со встречными объектами и преградами к дополнительным их разрушениям.

Детальный анализ связи подземных и поверхностных вод должен проводиться для конкретного водосборного речного бассейна с учетом основных процессов гидрогеодинамики в существующих породах горного массива. Это позволяет провести математическое моделирование развития данных процессов в рамках соответствующих дифференциальных уравнений с учетом таких важных характеристик пород как коэффициент извилистости, степень гетерогенности, коэффициент пористости, трещиноватости, эффективного напряжения и др. [19].

Мы не имеем возможности провести подобный анализ в настоящей статье, но в следующем разделе остановимся на некоторых общих математических моделях развития селя.

4. Физико-математическая трактовка модели – основные соотношения

Механизм активизации селевых процессов может быть описан в рамках общих модельных представлений о потенциальном селевом массиве как о волновом процессе (в принципе – с диссипацией) в нелинейной системе, в которой происходит непрерывный процесс самоорганизации упорядоченных волновых структур.

Наблюдаемые в природе принципиальные закономерности при образовании и распространении селевого выброса сводятся к следующему: внезапность возникновения (как во времени, так и по пространству), наибольшая интенсивность концентрированного селевого потока/струи в первоначальный момент, превышение массы воды в образовавшемся селе по сравнению с количеством выпавших осадков, непрерывная подпитка первоначального селевого импульса и его усиление при распространении, определенная повторяемость селя во времени, в т.ч. в локализованных местах. Эти факторы и обусловливают открытость и нелинейность рассматриваемой системы с распределенной по пространству и времени обратной связью.

Все это позволяет использовать солитонную модель, с помощью которой может быть математически промоделирован процесс возникновения и распространения селевого потока.

Как известно [4, 17, 18], солитон – так называемая уединенная волна, описываемая в простейшем случае классическим уравнением Кортевега-де Вриза, – волновой объект (по сути – группа связанных волн в более общем случае нелинейного уравнения Шредингера), которая может распространяться в среде на большие расстояния без изменения формы и амплитуды; более того, солитоны могут «проходить» друг через друга без изменения своей формы (неразрушающие столкновения солитонов).

Солитоны возникают в физических системах, в которых дисперсия распространяющихся волн – распределение энергия/импульс, – т.е. зависимость их скорости движения от длины волны, компенсируется нелинейностью среды (связывание энергии волн), в которой эта группа волн распространяется. В результате такого баланса и возникает уединенная волна. При этом данная сбалансированность происходит на непрерывном промежутке значений скоростей волнового импульса.

В нашей задаче нелинейность обеспечивается подпиткой селя подземными водами, а дисперсия – соответствует делокализации селя за счет пространственного распределения его потоков при сходе. При этом происходит и затухание селя, т.е. также перераспределение энергии импульса, но уже из-за процессов диссипации – влияния трения на селевой поток со стороны поверхности массива, по которой он распространяется, в т.ч. из-за взаимодействия твердых фракций селя с окружением, внешними препятствиями и друг с другом (слипание, связывание с водой, разрушение и т.д.).

Исходя из этого, селевой процесс, как однонаправленное распространение длинных волн (слабо представлена периодичность по пространственной координате) в диспергирующей среде (в первом приближении – с сохранением энергии), можно описать упоминавшемся уравнением Кортевега-де Вриза для амплитуды волны (волнового пакета), которое в одномерном случае с точностью до численных коэффициентов имеет вид [4, 17].

$$\frac{1}{v}\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}+\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}+\beta\frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^3}+au(x,t)\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}=0, \qquad (1)$$

где третий член описывает дисперсию волн в системе, а четвертый член – ее нелинейность (зависит от самой величины смещения $u(x, t)$); α, β – некие числовые коэффициенты, однако зависящие от глубины канала (русла), когда вода находится в состоянии покоя; v – скорость распространения. В нормализованном виде записи

уравнения (1) второй член ассоциируется с первым, и уравнение (1) включает в себя только 3 члена.

Решение этого нормализованного уравнения для бегущего со скоростью v импульса хорошо известно [17]:

$$u(x,t)=\frac{v}{2}\sec h^2\left(\frac{\sqrt{v}}{2}(x-vt)\right), \quad (2)$$

где $u(x,t)$ – определяет вертикальное смещение единицы селевой массы относительно положения покоя, зависящее от пространственной координаты (x) и времени (t); v – скорость селевого импульса, знак sec h обозначает гиперболический синус.

Следствием решения (2) является факт, что скорость волнового пакета прямо пропорциональна амплитуде солитона ($v \sim u$), а ширина Δ – обратно пропорциональна корню квадратному из амплитуды, т.е. скорости $\left(\Delta \sim \frac{1}{\sqrt{v}}\right)$. Это имеет принципиальное значение для распространения солитона и определяет все его физические проявления. Профиль такой волны представляет собой возмущение колоколообразной формы с некоторой максимальной амплитудой (определяет мощность селя), не изменяющееся со временем по мере его распространения. На это можно посмотреть по другому: продолжающее вовлечение подземных вод в развивающийся сель, о котором шла речь выше, приводит к возрастанию скорости селевого импульса. Такое увеличение скорости селевого импульса приводит к его существенной модификации: он становится более узким и его амплитуда увеличивается (ср. с [3, 4]).

Однако, для реальных условий энергия солитона не сохраняется из-за эффектов диссипации энергии и притока энергии за счет внешних воздействий (соответственно, потери и приток энергии). Последнее – принципиально для нашего подхода, когда идет подпитка селевого потока за счет подземных вод.

На первоначальном этапе этот процесс открытости системы можно учесть методами теории возмущений, когда в правую часть (1) можно ввести дополнительный член εR, явно зависящий от x, t, u, а также частных производных от u (где ε – малый параметр) [17].

Возмущение εR можно представить в виде ($-\varepsilon u$), соответствующее постепенному изменению мощности селевого потока в нашей модели. При этом имеем: $\varepsilon > 0$ для потерь энергии и $\varepsilon < 0$ для притока энергии.

Учет этого фактора приводит к медленному изменению с течением времени скорости v. Это приводит к важному результату, что амплитуда солитона эволюционирует во времени в соответствии с сильной экспоненциальной зависимостью [17]

$$u(t) \sim u(0)e^{-\varepsilon t}. \quad (3)$$

В нашем случае притока энергии ($\varepsilon < 0$) мощность селя будет возрастать во времени (по крайней мере, в начале его формирования). Параметр $1/\varepsilon$ в (3) определяет характерное время трансформации солитона – от начала выплеска селя ($t = 0$). Такое поведение во времени в рамках нашего подхода может быть проинтерпретировано следующим образом.

Через неупорядоченные трещины в породе массива по направлению к руслу под землей собирается вода («снизу-наверх») до определенной критической массы, которая, найдя ослабленное место в породе, – в соответствующей трещине, – мощной струей вырывается на поверхность. В результате выброса, на основе гидродинамических закономерностей, давление в области «ворот селя» резко падает, что приводит к засасыванию ближайших вод совместно с твердым материалом, которые добавляются к первоначальному импульсу. Этот момент – важный для нашей модели, и такое усиление мощности селя ($\varepsilon < 0$ в (3)) за счет подземных вод (собственно и приводящих к нелинейности) рассматривается впервые.

Хотя решение (3) верно для малых ε, обозначенная тенденция правильно отражает существо процесса в общем случае.

Таким образом, с учетом обсуждаемой подпитки от подземных вод в речном бассейне (описывается нелинейным членом в уравнении Кортевега-де Вриза) селевому импульсу можно приписать свойства солитона, и он в процессе распространения по склону горы сохраняет свою форму. Близлежащие большие водные объекты (водохранилища и др.), выше точки выброса селя, создают дополнительное внутреннее давление в горном массиве (также приводящее к подпитке селя) и провоцируют, во-первых, более ранний выброс воды и пород в селе. Аналогичное влияние могут оказывать и нижележащие поверхностные водные объекты в случае их исходной изолированности по подземным водным каналам в первоначальном состоянии речного бассейна, о чем речь шла выше.

Но сейчас нас интересует второй фактор – увеличение амплитуды солитона. Оно не может происходить непрерывно, что ясно из требования фундаментального физического принципа по энергетической выгодности состояния системы – оно (в устойчивом состоянии) должно характеризоваться минимумом энергии.

Поэтому в процессе распространения первоначально сформированного селевого импульса (собственно, солитона) с увеличивающейся амплитудой (из-за обозначенной подпитки) должен происходить его распад на некоторое число объектов – вторичных солитонов (сателлитов) – меньшей амплитуды.

Действительно, расчетные зависимости распространения селевого потока в рамках данной солитонной модели демонстрируют этот эффект. Соответствующие графики получены с помощью программы Mathematica; результаты представлены на соответствующих нормализованных зависимостях рис. 2 для некоторых безразмерных параметров для распадающегося солитона (конкретные числовые параметры для динамики развития селя вводить трудно, поэтому здесь мы ограничиваемся анализом общей тенденции, что, впрочем, не влияет на универсальность получаемых выводов при данном подходе).

С точки зрения теории солитонов данная неустойчивость и такой распад происходит, начиная с некоторой критической величины амплитуды солитона (рис. 2,а показывает данный распад), т.е. речь идет о пороговом эффекте. Число рождающихся сателлитов пропорционально амплитуде исходного солитона, а их парциальные скорости распространения пропорциональны амплитуде каждого сателлита. При этом, согласно предлагаемой модели, селевые солитоны должны проходить друг сквозь друга, не изменяя своей амплитуды и формы (рис. 2,г) после их разбегания. В результате этого во время перекрывания сателлитов профиль ансамбля/цуга солитонов изменяется (рис. 2,б-в), но в итоге происходит их упорядочивание (самоорганизация) в пространстве, что и определяет окончательный характер профиля селевого потока (рис. 2,г). Важно, что селевой процесс на этапе, соответствующем рис. 2,б,в, может существенно усиливать его единовременное разрушительное воздействие (локализация в одном месте большой массы/энергии потока).

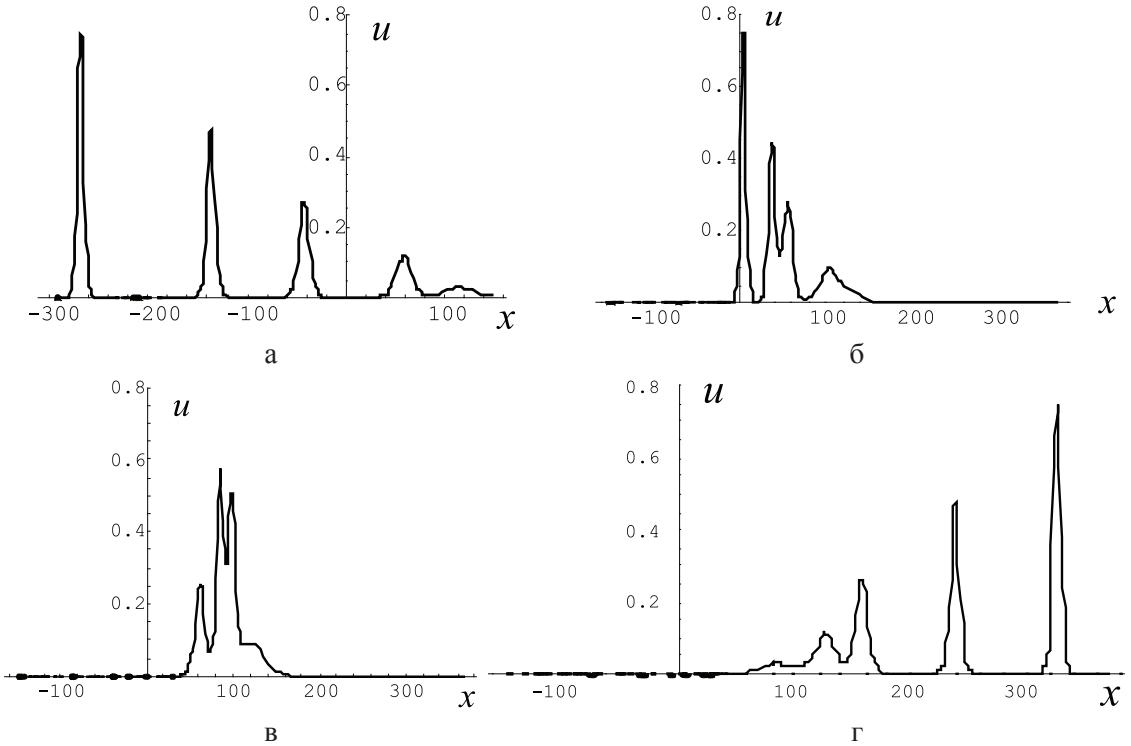


Рис. 2. Профиль распространяющейся солитонной волны в разные/последовательные моменты времени: $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ в относительных единицах (по осям координат приведены безразмерные пространственные (по горизонтали – x) и амплитудные (по вертикали – u) характеристики солитона): а – t_1; б – t_2; в – t_3; г – t_4

Нами промоделировано также рождение одного, двух и большего числа солитонов в зависимости от мощности первоначального солитонного импульса (рис. 3).

Таким образом, в зависимости от мощности исходного селевого выброса происходит его распад на разное число солитонов/селевых потоков. Хотя сам по себе факт существования такого класса решений известен давно для уравнения (1), но его практическое нахождение представляет собой сложную задачу (ср. с [17]). Поэтому результаты рис. 3 имеют особую ценность при оценке возможных режимов селевого потока при мощных начальных выбросах с учетом реализуемого дебита вовлекаемых подземных вод.

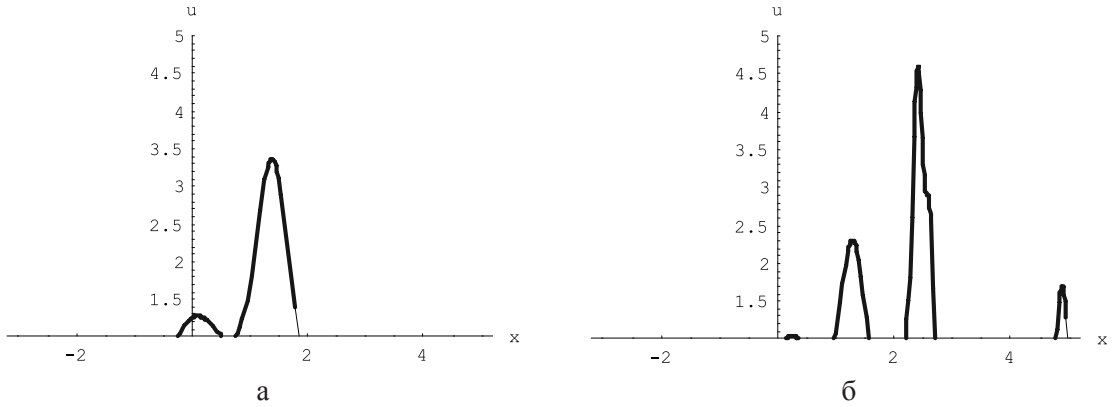


Рис. 3. Различное число рождающихся солитонов (нормализированные картинки) в зависимости от величины нелинейного параметра, определяющего мощность первоначального солитонного импульса (начальный выброс селя): а – рождение двух солитонов; б – рождение 3-4 солитонов.

Итоговая картина развития селя представляется следующим образом.

Ливневые осадки способствуют (в т.ч. за счет подземных вод) увеличению мощности и ширины наблюдаемого поверхностного стока, вследствие чего образовавшаяся группа распространяющихся волновых объектов ассоциируется наблюдателем с речной водной поверхностью, но их скорость лавинно нарастает из-за подпитки подземными водами, и эта волновая группа распространяется на большие расстояния. В процессе распространения, даже вдали от зоны выпадания осадков, бегущие солитоны усиливаются новыми порциями воды, исходящими из ворот селя, что позволяет им сохранять свой профиль за счет компенсации действия дисперсии (влияние нелинейности), а также блокирования затухающих факторов процесса (влияние подпитки из подземных источник). Следует отметить, что в рамках данной модели воздействие селя происходит не однократно, а многократно по количеству родившихся солитонов.

Таким образом, дальность распространения и скорость селя в значительной степени определяются параметрами, характеризующими его солитонную природу.

Упоминавшийся выше важный нелинейный эффект – процесс опрокидывания, характерный для сильно нелинейного и неоднородного по пространству процесса, также может быть получен в рамках солитонного подхода (уравнение (1)), но требует более высоких приближений для учета неоднородной зависимости скорости потока от пространственных координат (ср. с [17,18] процесса. Этот эффект приводит в момент столкновения со встречными объектами к дополнительным разрушениями по руслу за счет явления перехлестывания.

Если в русле реки нет сильного поверхностного стока, и подземный водный пул недостаточно мощный, то селевой поток достаточно быстро затухает ($\varepsilon > 0$ в (3)), оставляя на финишном этапе определенную «спокойную» массу. В этом случае можно говорить о маломощном, родившемся в воротах, селе. Это возмущение и есть то, что обычно называют длинной волной. В используемой теории распространения импульса при его первоначальной малой интенсивности (ниже пороговой для взрывного характера), процесс не является солитонным, а представляет обычный волновой/аддитивный процесс для распространяющейся волны – без усиления. В этом случае возникают осцилляции на ее хвосте (рис. 4). В этом случае селевой процесс быстро затухает и не представляет особой опасности.

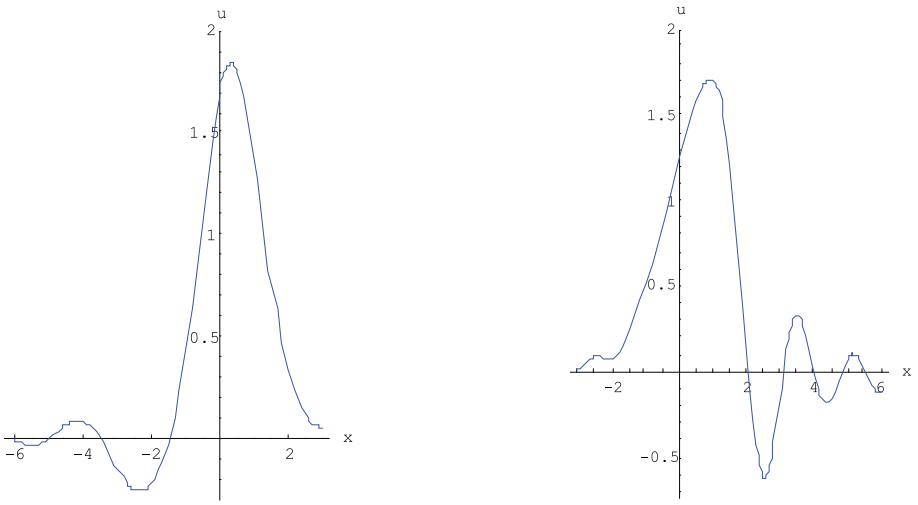


Рис. 4. Волновой пакет с осцилляциями на хвостах.

Проведенный анализ показывает, что селевой процесс можно представить в виде четырех этапов (рис. 5): на первом этапе происходит основной выброс селя; на втором – его распад на отдельные солитоны-сателлиты; на третьем этапе происходит самоорганизация этих сателлитов – солитоны выстраиваются по величине своих амплитуд в процессе своего распространения; на заключительном (четвертом) этапе происходит опрокидывание (большая нелинейность) или рассасывание (большая диссипация) солитона.

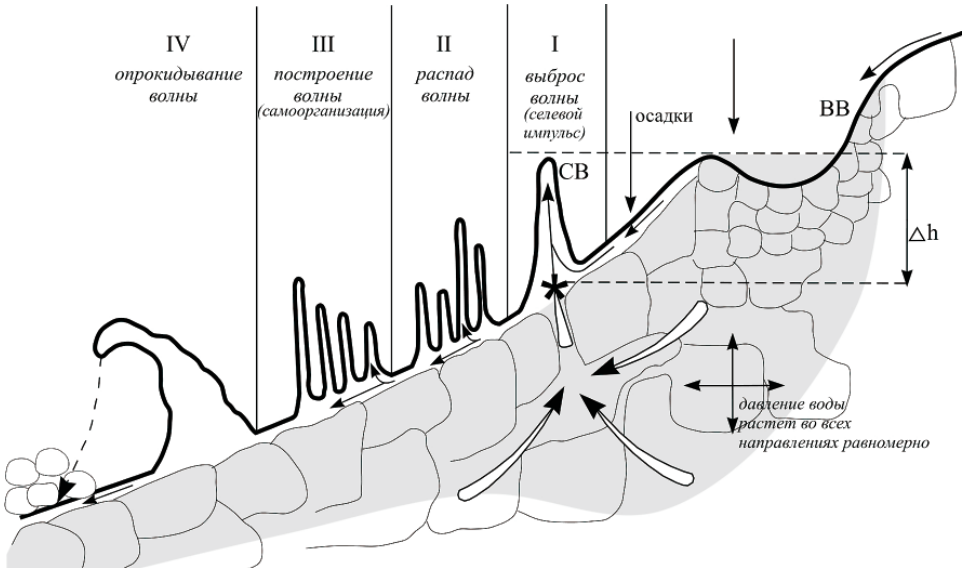


Рис. 5. Этапное развитие и распространение селевой волны:
*ВВ – водосборная воронка; СВ – селевая волна; * – ворота селя;*
Δh – гидростатический напор; – вода; – подземные воды

Очевидно, что такой сюжет развития процесса может иметь место при определенных (селеопасных) значениях уклона русла [19,20]. Действительно, в условиях очень крутого склона водный пул не может выступать как составляющий/организующий модуль единого процесса образования селя. Это связано с характерными временами взаимодействия составляющих сель компонентами (вода, породы, их морфологические особенности и др.) [16]. Данный вопрос требует отдельного численного анализа вне рамок настоящей работы; его качественные характеристики, связанные

с уклоном и структурой пород рельефа, неоднократно обсуждались в литературе (см. напр. [16, 19, 20]).

Наконец, отмеченная в конце раздела 3 периодичность процесса селеобразования на данной территории также находит объяснение в рамках используемой солитонной модели. Действительно, такие решения (локально периодические, но не синусоидальные) существуют для уравнения (1). Однако, они переходят к предельному случаю уединенной бегущей длинной волны, рассматриваемой нами для случая однократного схода селя в форме бегущего потока.

5. Предварительный анализ возможных причин катастрофического наводнения в г. Крымск (июль 2012 г.)

На основе вышеизложенных позиций попытаемся кратко проанализировать ситуацию с катастрофическим наводнением в г. Крымске в июле 2012 г. Существует несколько научных и обывательских трактовок этого события.

В официальных отчетах отмечено (например, Института географии), что в районе г. Крымска 6–7 июля выпало 65–156 мм осадков. При этом основными препятствиями для водных потоков стали заторы по руслу малых рек, транспортным системам и др., которые сыграли роль преград и накопителей воды, а затем были прорваны, – произошло затопление территории.

Однако, возникают следующие сомнения по поводу этого утверждения.

Во-первых, рядом расположенный водосборный бассейн у г. Абинска обширнее по площади, однако, большая вода там прошла незамеченной.

Во-вторых, очевидно, что даже очень сильный ливень не в состоянии доставить такое огромное количество воды на поверхность.

Здесь мы представляем свою трактовку данного катастрофического события, основываясь на позиции, что практически невозможно его объяснить с точки зрения рассмотрения как исключительно поверхностного процесса.

Ситуацию разделим на события, происходившие в разных притоках реки. Основные события, определившие катастрофу, связаны с р. Неберджай. (рис. 6).

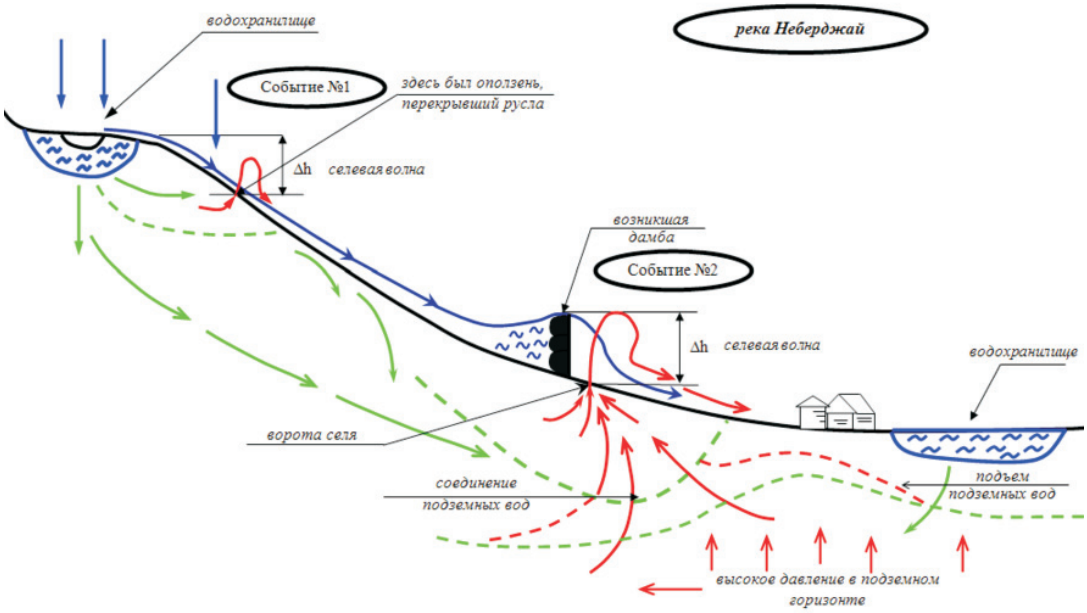


Рис. 6. Анализ причин возникновения катастрофического наводнения на р. Неберджай в виде функциональных событий

Событие № 1. Установлено, что уровень Неберджаевского водохранилища, расположенного практически в истоках реки, существенно не изменился. Но клапан сброса исправно работал, то есть избыточная вода просачивалась вниз. По свидетельству очевидцев ниже по течению в горах произошел оползень, запрудивший русло, где образовался искусственный водоем (газета «Комсомольская Правда», 13–19 июля 2012). Наличие оползня подтверждается имеющейся фотографией. Совершенно очевидно, что здесь могла сформироваться селевая волна, но не очень большой мощности, поскольку

гидростатический напор был слаб в силу того, что был небольшой перепад высот.

Можно также предположить, что стихийно образовавшаяся плотина была просто прорвана, хотя в любом случае, этот факт, конечно, увеличил мощь водного потока, но не до катастрофического уровня.

Событие № 2. Роль Неберджаевского водохранилища в связи с имеющей место важной предысторией заключается в следующем. Во-первых, пополнение водохранилища дождевой водой способствовало резкому усилению подводного стока, который концентрировался в подземном пуле в районе слияния двух рек (это зона бифуркации – раздвоение русла, где наблюдается сильная трещиноватость пород и обеспечивается усиленное подтягивание грунтовых вод). Возникшая в районе автодороги дамба сыграла роль трамплина, через который перехлестнул водный поток. В этот момент сразу за дамбой (на короткое время) образовалась воздушная камера с пониженным давлением. Этого оказалось достаточно для возникновения «ворот селя» у основания дамбы. Водный поток с силой вырвался на высоту дамбы (около 7 м).

Во-вторых, Атакайское водохранилище, пополняясь, оказывало непрерывно усиливающееся гидростатическое давление, увеличивая сток в подземные водные горизонты, в которых сильно возрастало давление. В свою очередь селевая волна привела к понижению давления в зоне препятствия, и грунтовые воды, в соответствии с изменившимся давлением, прорвали перемычки и соединились с речным подземным пулом (горизонтом) – на поверхность вырвалась вода из мощного подземного горизонта.

Такой консолидированный поток огромной силы и мощности и направился в сторону г. Крымска, разрушая все на своем пути. Процесс шел до тех пор, пока подземное давление не стабилизировалось.

Таким образом, основная масса воды, обрушившаяся на г. Крымск, была, по-видимому, подземной, значительно обогащенной илом и песком. Кстати, после данной катастрофы на поверхности наблюдались зоны с бетоноподобной взвесью. В разделе 1 упоминалось о таком выносе (через систему трещин) породы, благодаря выбросу подземных вод из-за эффекта тиксотропии.

Событие № 3. Оно происходило на р.Баканка. Анализ космоснимков, проведенный сотрудниками ИТЦ «СканЭкс», показал, что по данным оперативного спутникового мониторинга последствий затопления в г. Крымске обнаружен факт обмеления пруда, расположенного в пяти километрах вверх по течению от Нижнеабаканской станицы. Установлено, что в этой станице смыто 60 % построек, мосты и различные подвижные объекты (автотранспорт) и др. Это привело к большому числу раненых, погибших, пропавших без вести.

Учитывая эти факты, можно полагать, что простой прорыв плотины не мог привести к таким последствиям (не так много воды сразу прорывается). Вероятно, что в этом районе также образовалась локальная селевая волна за счет подземных вод, мощность которой была достаточна для отмеченных разрушений.

Принципиально, что ничего подобного не наблюдалось в соседнем водосборном бассейне, где фактически отсутствуют какие-либо техногенные объекты с большими водными ресурсами.

Проведенный краткий анализ позволяет сделать следующие **выводы**.

Катастрофические разрушения, которым подвергся г. Крымск, были обусловлены, главным образом, вырвавшимися на поверхность грунтовым водами.

В бассейне р. Неберджай образовалась консолидированная система поверхностных и подземных вод, функционировшая в едином гидрологическом режиме. Провоцирующим моментом , несомненно, явились сильные ливневые осадки.

Крупные водные бассейны в верховьях рек сыграли роль водонапоров, способствующих изменению режима распределения подземного гидростатического давления. Наличие водохранилищ в предгорной части способствовало пополнению подземных водных горизонтов. Образование заторов в руслах рек создало предпосылки образования селевых волн по принципу артезианских скважин.

Таким образом, невозможно объяснить катастрофические последствия данного события, рассматривая речные русла как исключительно поверхностные образования, зависящие только от погодных условий (сильные ливни). Реки – это природные трехмерные образования и процессы взаимодействия поверхностных и подземных вод определяют принципиальный режим функционирования единой водной системы речного бассейна. Они требуют пристального изучения в едином комплексе, включая топологию трещиноватости и свойства трещиноватых горных пород в данном водосборном речном бассейне, их засоренность породами, а также, разумеется, атмосфер-

ные и климатические условия в соответствующих временных периодах. Большой информативностью будут обладать прямые измерения уровня и гидростатического давления в различных горизонтах подземных вод, проведенные, например, с помощью пробуренных артезианских скважин, которые можно использовать для непрерывного мониторинга состояния водных ресурсов в потенциально опасных зонах.

Заключение

В данной работе рассматриваются речные русла не только в аспекте поверхностной гидрологии суши, а как природные системные 3D-объекты, выполняющие сложную функцию регулирования напряжений в пределах земной коры из-за пространственного изменения глубинного гидростатического давления. Речь идет о концепции, утверждающей, что в развитии селевого процесса принимают участие как поверхностные, так и подземные воды**.** Необходимым условием их взаимосвязи является наличие русловых трещин, определяющих дебит подземного водного пула, и большого количества водных осадков. Возникновение селя происходит обычно по механизму действия артезианской скважины, хотя возможно влияние механизма, аналогичного возникновению гейзера. Процесс носит волновой характер с явными признаками самоорганизации и может быть описан в рамках солитонной модели.

Численное моделирование процесса селеобразования при наличии конкретных параметров для данной территории позволит оценить ожидаемую мощность селя, его разрушительную силу и прогнозировать необходимые защитные мероприятия. Анализ всех этих факторов, влияющих на образование селя, и особенно – их взаимодействия друг с другом должно позволить спрогнозировать условия возникновения селя, в т.ч. возможное место его прорыва. Однако, эта задача (фактически, определение уровня риска) требует детальных сведений об анализируемой территории (географических, морфологических и т.д.), о структуре почвенного покрова, топологии речного водного бассейна, о сезонных климатических условиях, сейсмоопасности и др.

Что касается фиксации времени селевого выброса, то эта задача намного сложнее и на современном этапе понимания механизма возникновения селевых процессов, взаимосвязи многих факторов и особенно, – их связи с природными и антропогенными особенностями территории, вряд ли разрешима даже в условиях использования больших вычислительных мощностей. Ситуация здесь не менее сложная, чем точное прогнозирование времени наступления землетрясения.

Данная концепция позволила кратко рассмотреть возможные причины катастрофического наводнения, происшедшего в г. Крымске в июле 2012 г. Более подробное исследование этого вопроса требует анализа конкретных фактических данных по состоянию речного бассейна и водных ресурсов в данной местности, включая уровень подземных вод до и после катастрофы, а также анализа влияния искусственных инженерно-технических сооружений и их состояния на подземные водные горизонты, прежде всего в аспекте усиления гидростатического давления в них.

Без подобного рассмотрения представляется проблематичным любой прогноз катастрофических явлений, и, соответственно, реальная оценка риска их возникновения и необходимых предупредительных мер.

Список литературы

1. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. – М.: ООО «ДЭКС-ПРЕСС». – 2003. – 352 с.

2. Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н. Вычислительные технологии. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 31.

3. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. – Л.: ГИМИЗ, 1987. – 280 с.

4. Казаков Н.А. Лавинный фронт как уединенная волна – солитон // Материалы гляциологических исследований. – 2005. – Вып. 100. – С. 24.

5. Михайлов В.О. Трехмерная математическая модель обвальных процессов // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2011. – № 4. С. 53–58; Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов. Инженерная геология. – сент. 2011.

6. Трифонова Т.А. Горное речное русло: энергетическая модель развития. – М.: Докл. РАН, 1994. – Т. 337, № 3. – С. 334–338.

7. Трифонова Т.А. Модель развития горного водосборного бассейна. – М.: Природа, 1994. – № 2. – С. 106–109.

8. Трифонова Т.А. Речной водосборный бассейн как самоорганизующаяся природная геосистема // Изв. РАН, серия географическая. – 2008. – № 1. – С. 28–36.

9. Трифонова Т.А. Формирование почвенного покрова гор: геосистемный аспект // Почвоведение. – 1999. – № 2. – С. 174–181.

10. Трифонова Т.А. Энергетическая модель развития горного русла. – М.: Геоморфология, 1995. – № 4. – С. 13–22.

11. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986.

12. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1970. – 160 с.

13. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Колос, 2008. – 656 с.

14. Пославский В.В. Об одной катастрофе на Памире. (История Сарезского озера) // Гидротехника и мелиорация. – 1968. – № 3.

15. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 2007. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 2006.

16. Таги-заде В.А. Структурно-динамические особенности селевого потока и анализ работы устройства селевой защиты // J. of Qafaz University. – 2010. – № 29, Vol. 1. – P. 79. –.

17. Инфельд Э., Вуланс Дж. Нелинейные волны, солитоны и хаос. – М.: Физмалит, 2006.

18. Скотт Э. Нелинейная наука. Рождение и развитие когерентных структур: пер. с англ. И.А. Макарова; под ред. проф. А.Л. Фрадкова. – М.: Физматлит, 2007.

19. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – М.: КДУ, 2009. – 334 с.

20. Эглит М.Э. Неустановившиеся движения в руслах и на склонах. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 96 с.