

Л. В. КУКСИНА\*, В. Н. ГОЛОСОВ\*\*\*, Ю. С. КУЗНЕЦОВА\*

\*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Ленинские Горы, ГСП-1, Москва, 119991, Россия, ludmilakuksina@gmail.com, gollosov@rambler.ru, kuzyulia@gmail.com

\*\*Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420000, Россия

### ЛИВНЕВЫЕ ПАВОДКИ В ГОРАХ: ИЗУЧЕННОСТЬ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ

*Проведен детальный анализ существующих представлений о внезапных кратковременных бурных паводках. Это одно из наиболее распространенных и опасных природных явлений на планете, характеризующееся высокой скоростью развития и небольшой продолжительностью. Такие паводки чаще всего происходят в Северном полушарии в регионах с умеренным и субтропическим климатом. Их изучение находится на начальном этапе, на данный момент у исследователей нет единого мнения, что именно считать внезапным паводком, во многих странах отсутствует и сам специальный термин для их обозначения. Определено, что ключевые условия формирования внезапных паводков — интенсивные ливни небольшой продолжительности, приуроченность бассейна реки к горным регионам и малая площадь водосбора, в связи с чем предложено называть их внезапными ливневыми паводками. Предложена схема природных факторов формирования внезапных ливневых паводков и их отличий от селей и паводков других типов. Определено, что основные проблемы исследования механизмов формирования и прогнозирования этих явлений связаны с их малым пространственно-временным масштабом.*

Ключевые слова: осадки, рельеф, площадь водосбора, сель, гидрометеорологические факторы, литолого-геоморфологические факторы.

L. V. KUKSINA\*, V. N. GOLOSOV\*\*\*, Yu. S. KUZNETSOVA \*

\*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia, ludmilakuksina@gmail.com, gollosov@rambler.ru, kuzyulia@gmail.com

\*\*Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya, 18, Kazan, 420000, Russia

### CLOUDBURST FLOODS IN MOUNTAINS: STATE OF KNOWLEDGE, OCCURRENCE, FACTORS OF FORMATION

*A detailed analysis is made of the current ideas concerning floods of a special type. We examine sudden short-duration torrential floods, one of the most widespread and hazardous natural phenomena in the world characterized by a high rate of development, and by a short duration. It is shown that such floods are of the most widespread occurrence in the Northern hemisphere in regions with a temperate and subtropical climate. It is established that such floods are in a primitive stage of study, which is testified by the fact that there is no general consensus as to what should be treated as a sudden flood. It is pointed out that a special term designating them is also absent in many countries. It is determined that the key formation conditions for sudden floods include intense short-duration cloudbursts, occurrence of a river basin in mountainous regions and a small drainage area; on this basis, it is suggested that they be termed sudden cloudburst floods. We suggest the scheme of natural factors for formation of sudden cloudburst floods and their differences from mudflows and floods of other types. It is determined that the main problems of investigating the formation mechanisms and forecasting the aforementioned floods are associated with the small spatiotemporal scale of these phenomena.*

Keywords: precipitation, drainage area, mudflow, hydrometeorological factors, lithologo-geomorphological factors.

### ВВЕДЕНИЕ

Внезапные кратковременные бурные паводки — одно из самых распространенных и опасных природных явлений на планете. Однако в настоящее время этот тип паводков наименее изучен, поскольку их развитие происходит в течение очень короткого периода (менее 6 ч), а зарождение, как правило, приурочено к горным областям, что существенно осложняет проведение мониторинга. Внезапный кратковременный бурный паводок (от англ. flash flood) наиболее часто определяется как

быстро развивающийся, но непродолжительный по времени, происходящий в течение нескольких часов после возникновения вызвавших его причин. Однозначного определения данного понятия нет. Во многих странах (в том числе и в России) отсутствует и сам специальный термин. Национальное управление океанических и атмосферных исследований в США (NOAA) идентифицирует явления такого типа как паводки, максимальный расход которых проходит в течение 6 ч после начала проливного дождя. По определению Международного центра по комплексному освоению горных районов (ICIMOD), внезапные паводки, ставшие результатом сильных дождей или прорыва дамбы, по сравнению с обычными имеют крайне высокую мутность, характеризуются резким ростом уровня воды (от нескольких минут до часов), транспортируют большое количество древесины. Сели, спровоцированные прорывом моренных или ледниковых озер, также относятся к категории внезапных паводков. Геологическая служба США (USGS) отмечает, что подобные паводки часто происходят в пустынных и полупустынных областях, где осадки бывают такими мощными, что не успевают проникать в почву, из-за чего происходит быстрая концентрация стока в сухих руслах. Департамент общественных работ Индонезии определяет внезапные паводки (местное название banjir bandang) как специфические паводки, образующиеся вследствие больших уклонов местности и характеризующиеся быстрым ростом уровня воды, крайне высокой кинетической энергией потока, приводящей к необратимой трансформации русла. Точного определения этого явления нет и в Японии. Согласно утверждению Японского инженерного общества по контролю эрозии, любой паводок, транспортирующий значительное количество наносов и древесины, может относиться к селям, внезапным паводкам или потокам, находящимся в переходной стадии между массовым перемещением частиц и транспортом взвешенных наносов (такие потоки могут наблюдаться в руслах с уклоном не менее  $10^\circ$ , т. е. осаждение наносов происходит на конусе выноса с уклоном менее  $10^\circ$ ). Таким образом, термином «внезапный паводок» называют целый ряд потоков, насыщенных наносами различной крупности и степени сортированности. В связи с большим разнообразием и неоднозначностью определения внезапных кратковременных бурных паводков возникает задача отграничения их от других явлений (например, селей).

Поскольку ливневые дожди — основная причина возникновения внезапных паводков, а высокая контрастность рельефа выступает необходимым условием их формирования, то, на наш взгляд, было бы логично называть их внезапными ливневыми паводками. Возрастающая численность населения, рост социально-экономической нагрузки на территории, где такие паводки имеют широкое распространение, способствуют тому, что все большее количество людей и хозяйственных объектов оказывается в зоне риска. Интерес авторов статьи к описываемому типу паводков объясняется тем, что подобные явления имеют место и на территории Российской Федерации, например на реках Черноморского побережья Кавказа. Однако часто они не идентифицируются как особый тип паводков и рассматриваются в качестве селей [1] или их подтипов [2]. В связи с этим главная задача настоящей работы — анализ причин возникновения паводков подобного типа, их распространенности и изученности в мире, а также выявление основных проблем их исследования и прогнозирования.

### ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ВНЕЗАПНЫХ ПАВОДКОВ

Причиной возникновения внезапных бурных паводков в более 85 % случаев выступают интенсивные дождевые осадки (как правило, конвективного происхождения), длящиеся не более 34 ч, выпадающие на небольшой территории. Другое важное условие — особенности рельефа [3], благоприятствующие быстрой концентрации стока воды и наносов. Существуют и другие факторы: разрушение естественных (обломочных, ледяных) или искусственных плотин, крупные приливные волны, извержения вулканов в гляциальной зоне или же в период максимальных снегозапасов на склонах, приводящие к интенсивному снеготаянию. Однако, на наш взгляд, их следует рассматривать как самостоятельные явления со схожим процессом прохождения паводка по реке, но иными причинами его возникновения.

Подавляющее большинство внезапных паводков приходится на Северное полушарие, зоны субтропического и умеренного климата (рис. 1), значительно меньшая их часть — на субэкваториальный пояс. Наибольшее количество жидких осадков в Северном полушарии выпадает в летне-осенний период, и число катастрофических паводков в это время существенно возрастает. Максимальное число случаев (20 %) происходит в августе, всего за период с июня по ноябрь проходит порядка 80 % паводков (рис. 2).

Стоит отметить, что условия возникновения внезапных паводков существенно различаются в США и странах Европы: если в США паводки в основном наблюдаются в полупустынных и пустынных областях, то в Европе они чаще образуются в более влажных условиях [4].

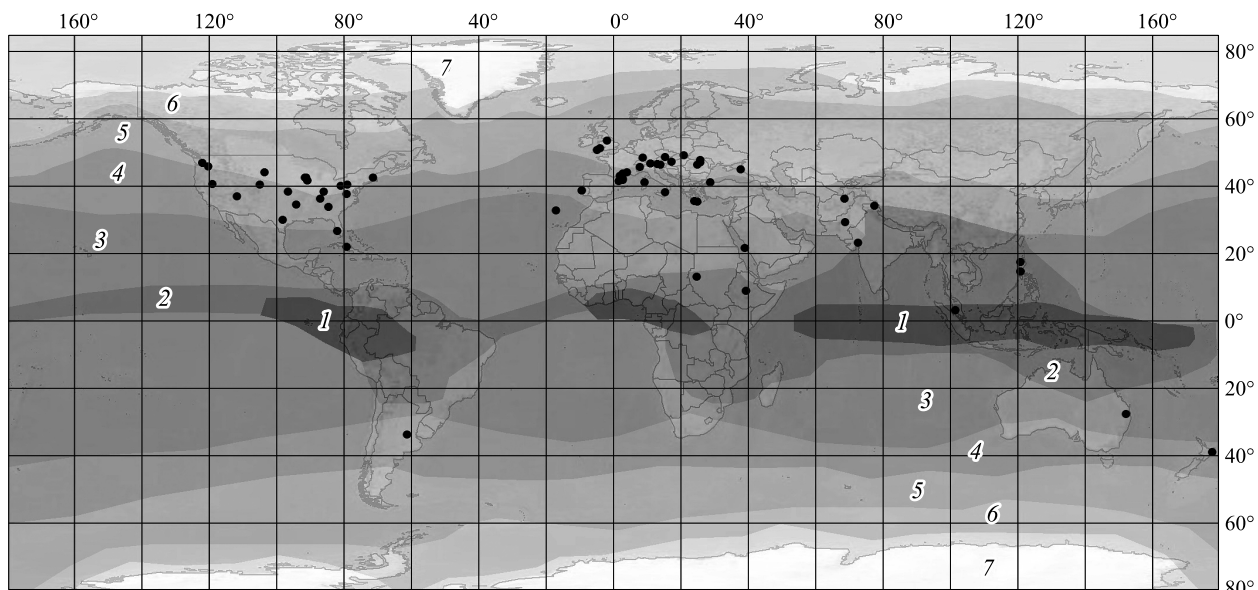


Рис. 1. Распространенность внезапных паводков в мире.

Климатические пояса: 1 — экваториальный, 2 — субэкваториальный, 3 — тропический, 4 — субтропический, 5 — умеренный, 6 — субарктический и субантарктический, 7 — арктический и антарктический. Точками показаны зафиксированные внезапные ливневые паводки.

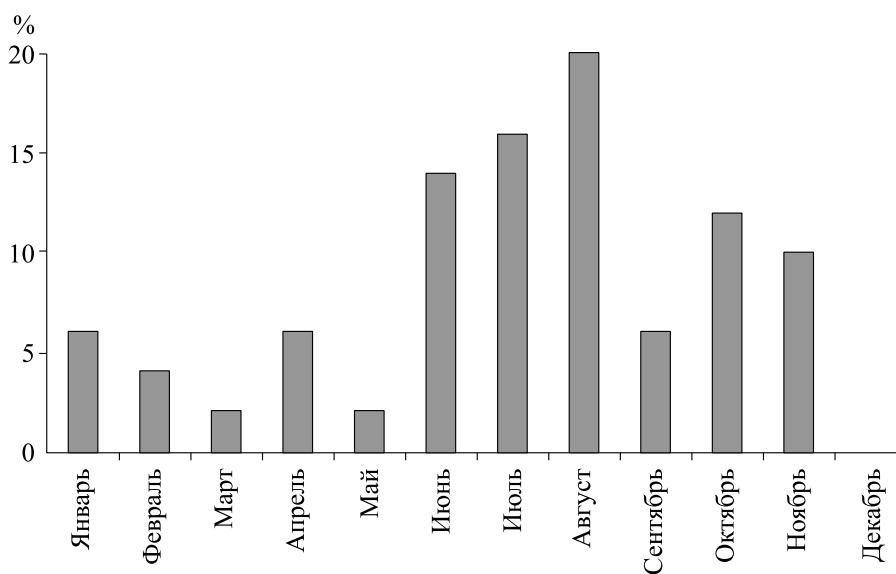


Рис. 2. Повторяемость внезапных паводков в различные месяцы года.

### ИЗУЧЕННОСТЬ ВНЕЗАПНЫХ ПАВОДКОВ

Кратковременные бурные паводки очень сложно охватить наблюдениями, поскольку они имеют небольшие пространственно-временные масштабы, и на рис. 1 только в той или иной мере отражены регионы, где были зафиксированы эти явления. Можно предполагать, что в действительности они распространены на более обширных территориях. Из 25 крупнейших бурных паводков, произошедших в Европе в последние 20 лет, лишь примерно половина охарактеризована данными стандартных гидрологических наблюдений [4].

На основе анализа 21 549 событий, зафиксированных на территории США в 2006–2012 гг., выявлены пространственные (плотность населения, городская и сельская местность), временные (продолжительность паводка и время его прохождения) и гидрологические (площадь бассейна) параметры

бурных паводков, а также зависимость от них числа жертв и пострадавших. Исследование показало, что паводки этого типа на территории США происходят, как правило, в теплое время года — с мая по сентябрь. Соответственно, тогда же фиксируется наибольшее число жертв и пострадавших от наводнений [5]. Чаще всего такие паводки наблюдаются в бассейнах водотоков очень малой площади (около 0,125–0,312 км<sup>2</sup>), что объясняется благоприятными условиями для быстрой концентрации стока. Чем меньше площадь водосбора, тем быстрее идет формирование волны паводка. Например, время добегания паводка (период между прохождением барического центра дождя и пиком паводка) для бассейна площадью 0,65 км<sup>2</sup> составляет порядка 40 мин, в то время как для бассейна площадью 165 км<sup>2</sup> — уже 5 ч [6]. В связи с этим именно паводки, возникающие в бассейнах наименьшей площади, наиболее разрушительны.

Первая попытка разработки атласа экстремальных паводков для территории Европы предпринята в работе [3]. Для этого была создана довольно подробная база данных, содержащая сведения о 550 наиболее экстремальных событиях, произошедших в Каталонии (10), Франции (236), Италии (73), Словакии (52), Греции (21), Румынии (152) и Австрии (34) за период с 1946 по 2007 г. Предполагалось, что в базу данных будут внесены характеристики бассейна реки (площадь водосбора, время концентрации стока, высота, уклон, использование земель, тип почв и др.), стока (минимальный и максимальный расходы воды различной обеспеченности, метод его оценки, средний сток, продолжительность паводка, сток наносов и др.), сведения об осадках (количество, продолжительность, число станций на территории бассейна, тип, пространственный охват, интенсивность, среднее годовое количество осадков, влажность), различные данные об ущербе вследствие прохождения паводка. Однако многие параметры, особенно требующие измерения непосредственно в период прохождения паводка, оказываются не установлены (например, практически во всех случаях отсутствуют какие-либо сведения о стоке наносов).

Тем не менее на основе собранных материалов составлена предварительная карта распределения приведенных значений пиковых расходов воды. Они максимальные на северо-западе Италии, юге Франции и северо-востоке Испании [3], что позволяет сделать заключение о более экстремальном характере паводков в средиземноморских регионах по сравнению с внутриконтинентальными областями (Румыния, Австрия и Словакия). Полученные выводы хорошо согласуются с результатами исследования пространственного распределения эрозионного потенциала дождей на территории Европы [7].

Анализ сезонной повторяемости паводков в разных странах показал, что паводки в Средиземноморье происходят преимущественно осенью (сентябрь–октябрь в Испании и Франции, август–октябрь в Италии), в то время как в континентальных странах их число возрастает в летний период (с мая по август).

Согласно данным наблюдений, 40 % всех наводнений в Европе в 1950–2006 гг. обусловлены бурными кратковременными паводками [8]. Ожидается, что увеличение количества осадков в континентальном [9] и глобальном [10] масштабах в связи с потеплением климата [11] приведет к тому, что паводки станут более частыми и мощными.

Поскольку внезапные ливневые паводки могут формироваться при определенном сочетании физико-географических факторов, их изучение целесообразно проводить на стыке различных наук, учитывающих воздействие метеорологических, гидрологических и геоморфологических причин [5].

Расходы воды и наносов во время паводков определяются комплексом взаимодействующих природных параметров: интенсивными дождями, водно-физическими характеристиками почвы (влажность, водопроницаемость, влагоемкость, общая мощность почвенного покрова), особенностями рельефа и литологии водосбора (уклоны склонов, густота линейных форм рельефа, конфигурация водосбора, устойчивость пород к физико-химическому выветриванию, глубина и направление залегания водоупорных пластов) и интенсивностью проявления различных экзогенных процессов. На них накладывается ряд антропогенных факторов, которые могут способствовать росту объемов поверхностного стока и смыва: увеличение площадей обрабатываемых земель на водосборе, доли селитебных территорий, антропогенно обусловленные лесные пожары.

Анализ имеющихся данных показывает, что порядка 80 % всех внезапных паводков на территории Европы происходит в бассейнах площадью менее 100 км<sup>2</sup> [4]. Особенно важную роль в их формировании играют две морфологические характеристики бассейна: орография, содействующая развитию более интенсивной конвекции, и рельеф, способствующий быстрой концентрации стока. Эта закономерность предполагает проведение более тщательной оценки особенностей рельефа малых речных бассейнов, подверженных воздействию ливневых паводков.

Большинство внезапных паводков по сравнению с паводками других типов, связанных, к примеру, с продолжительными осадками или снеготаянием, характеризуются очень низкими значениями

(в среднем 0,35) коэффициентов стока [4, 12], что указывает на необходимость учета при разработке прогнозов гидрологических условий, а также характера использования земель, от которого зависят процессы формирования стока.

По результатам анализа публикаций можно выделить ряд подходов к изучению внезапных паводков и систематизировать основные факторы, влияющие на их формирование и распространение.

### ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ВНЕЗАПНЫХ ПАВОДКОВ

В связи с отсутствием единого мнения по вопросу, что такое внезапный паводок и в чем заключается его отличие от селей, одна из первоочередных задач — разграничение этих явлений. По мнению Р. М. Айверсона [13], сель представляет собой грязекаменный поток, насыщенный несортированным твердым материалом с очень широким диапазоном гранулометрического состава частиц (до глыб и валунов), в то время как основная часть наносов, транспортируемая внезапным паводком, перемещается во взвеси. Нам представляется, что данный критерий не в полной мере отражает различие селей и внезапных ливневых паводков.

На наш взгляд, разница состоит в том, что при прохождении селя формируется мощная фронтальная волна, насыщенная несортированной смесью обломков различного размера, тогда как при внезапном ливневом паводке нарастанию расходов воды соответствует пропорциональное увеличение расходов наносов с соответствующим изменением механического состава взвешенных и влекомых наносов. Отчасти данное предположение подтверждается результатами исследований [14], где предложен гидрогеоморфологический подход к изучению этих явлений. Деление водосборов на предрас-

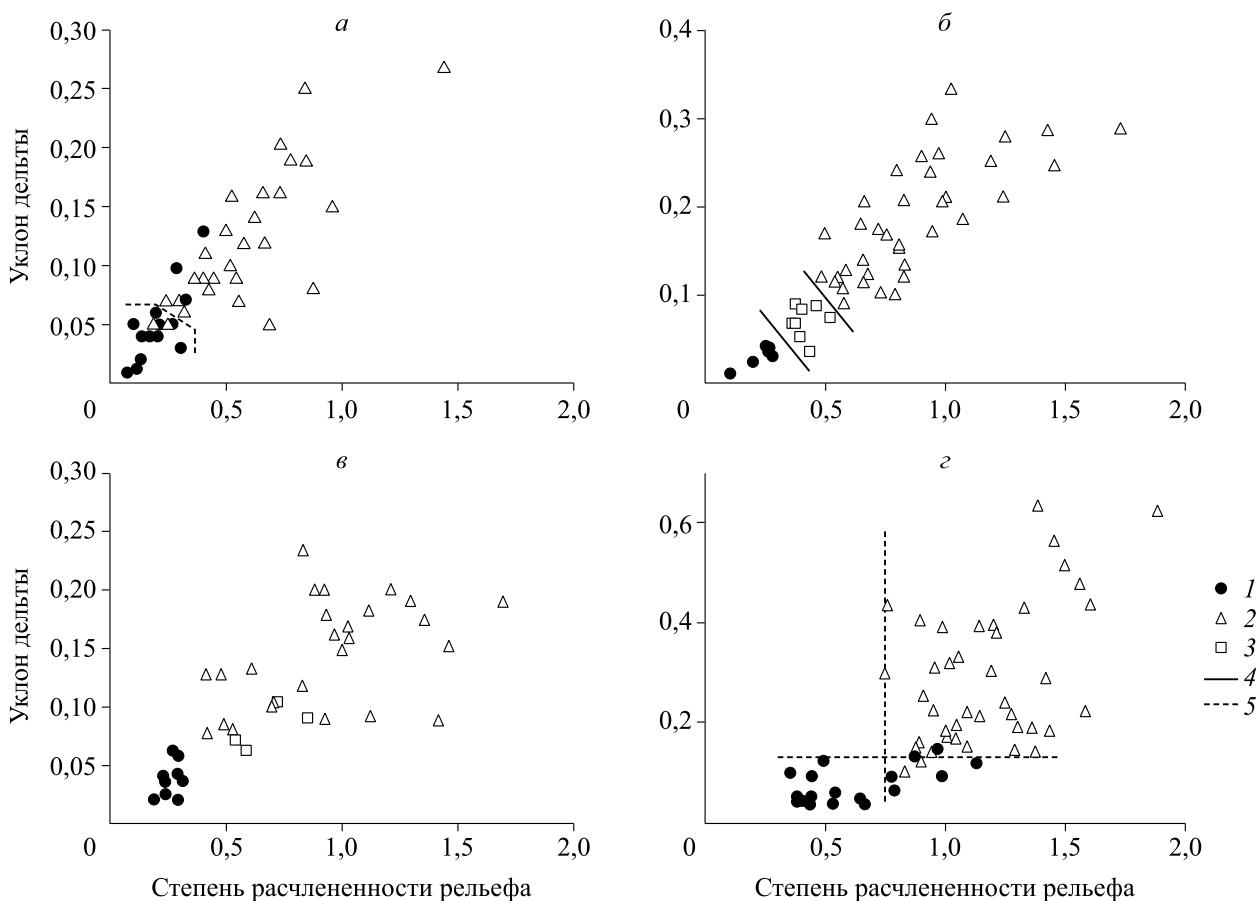


Рис. 3. Зависимость степени расчлененности рельефа от уклона дельты для селевых и паводковых водосборов, по [14].

*a* — Канадские Скалистые горы; *b* — Восточные Итальянские Альпы; *v* — Французские Альпы; *z* — Новая Зеландия. Водосборы: 1 — паводковый, 2 — переходный тип, 3 — селевой. Границы между типами: 4 — четкие, 5 — предполагаемые.



положенные к возникновению внезапных паводков или селей рекомендуется проводить на основе взаимосвязей морфометрических характеристик бассейна реки и типов потока, например, зависимости степени расчлененности рельефа и уклона конуса выноса, подтвержденной для ряда регионов (рис. 3). Впрочем, вполне вероятно, что существует некий переходный тип между ливневыми внезапными паводками и селями.

Другим условием для разграничения двух указанных понятий может служить относительная концентрация наносов в потоке [15]: если наносы составляют менее 20 % от объема стока, то поток относится к водным; если их концентрация превышает 47 %, то поток является селем; диапазону 20–47 % соответствует промежуточный тип потока.

Поскольку развитие внезапных паводков происходит в очень короткие сроки (менее 6 ч) и на небольших площадях (не более 1000 км<sup>2</sup>) [4], для их предсказания важна взаимосвязь площади бассейна и времени добегания паводка [16].

При изучении внезапных паводков большие перспективы имеют методы ландшафтной гидрологии [4, 17], позволяющие, основываясь на подобии условий формирования стока, переносить характеристики оцененных в отношении формирования внезапных паводков водосборов на бассейны рек, для которых данных нет натуральных наблюдений. Проведение региональных обобщений существенно расширит охват территории, улучшит понимание распространности явления. Подобный подход использован при анализе данных о распределении осадков, приводящих к прохождению внезапных паводков на реках Альпийско-Карпатского хребта (от Франции до Румынии) [18]. Это дало возможность выделить основные процессы, влияющие на возникновение паводков, и определить их сочетание в границах восьми областей с относительно однородными условиями формирования таких событий. В ходе данного исследования было установлено, что частота штормов, являющихся причиной возникновения внезапных паводков, увеличивается с ростом температуры воздуха и достигает максимума в июне в Центральной и Восточной Европе; в июле — на большей части территории Центральной Европы и в Восточной Европе, включая итальянские Альпы; в сентябре и октябре — на востоке Средиземноморья; зимой — в Южной Италии и восточной части средиземноморских бассейнов.

### ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАВОДКОВ

Таким образом, проведенные исследования внезапных ливневых паводков позволяют очертить круг вопросов, которые требуют более детального рассмотрения. Их можно разделить на две группы. В первую входит изучение взаимодействия факторов формирования внезапных дождевых паводков, которые определяют их возникновение. Факторы делятся на гидрометеорологические, литолого-геоморфологические и антропогенные, причем последние не являются необходимым элементом для внезапного паводка, но могут стать тем дополнительным звеном, благодаря которому обычный дождевой паводок может трансформироваться в экстремальный. Литолого-геоморфологические факторы (рис. 4) выявляются наиболее просто, так как они достаточно стабильны во времени и, в меньшей степени, в пространстве, что связано с возможным резким изменением параметров русел временных и постоянных водотоков, в которых образуется сток. Но до настоящего времени специализированный анализ рельефа и литологии для определения их влияния на формирование внезапных паводков практически не проводился.

Подобный же вывод применим к оценке роли гидрометеорологических факторов, хотя в этом случае установленные связи носят региональный характер и, безусловно, нуждаются в более тщательном изучении. На стыке этих двух групп находится фактор почвенного покрова. С одной стороны, формирование почв происходит в зависимости от состава слагающих территорию коренных пород и степени их устойчивости к процессам выветривания в данных климатических условиях, с другой — именно влагоемкость почв и степень их увлажнения на момент выпадения стокоформирующего ливня во многом определяет коэффициенты поверхностного и внутрпочвенного стока и тем самым предопределяет скорость добегания воды в русла временных и постоянных водотоков.

Ко второй группе вопросов относятся задачи установления параметров речных бассейнов, где возникают внезапные ливневые паводки. Они важны, поскольку тесно переплетаются с задачами прогнозирования таких паводков на конкретных территориях. В основном внезапные паводки приурочены к бассейнам малых рек (менее 100 км<sup>2</sup>), что обусловлено особенностями строения речных бассейнов. Осадки быстро накапливаются в горах, здесь же наблюдаются наиболее подходящие условия для концентрации стока. Однако зачастую реки, где происходит формирование паводков такого

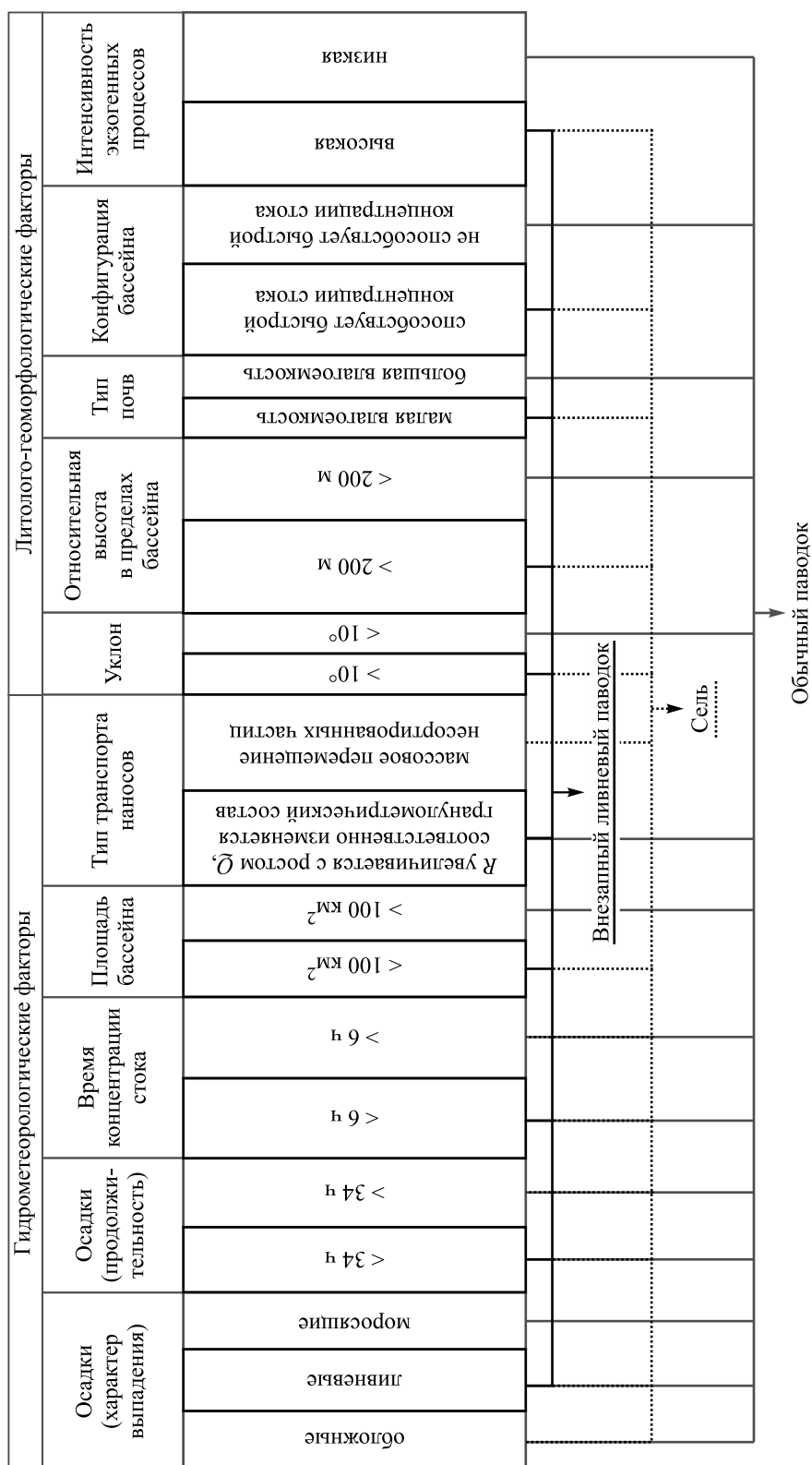


Рис. 4. Основные природные факторы формирования внезапных ливневых паводков и их взаимодействие.

типа, либо вообще не имеют сети наблюдений за гидрологическими параметрами (что связано как с малой площадью бассейнов, так и с их удаленностью и труднодоступностью в горных областях), либо станции оказываются разрушенными во время очередного события такого типа. Более того, даже если данные наблюдений доступны, очень трудно экстраполировать значения расходов воды, поскольку в период прохождения паводка морфометрические характеристики русла могут подвергаться очень сильным изменениям [19]. То же самое касается и мониторинга осадков, поскольку масштабы явления, провоцирующего паводок, как правило, значительно меньше, чем сеть постов по наблюдению за осадками.

Актуальность разработки надежных прогнозов таких паводков только возрастает в связи с увеличением числа людей, проживающих в зоне риска, и площадей городских территорий, где коэффициенты стока имеют намного большие значения, чем в сельской местности [20]. Рост рекреационного значения горных областей способствует тому, что все больше людей оказывается в зоне риска [21].

Развитие системы мониторинга бурных кратковременных паводков включает в себя изучение трансформации русел после прохождения паводка, радарные наблюдения за метеопараметрами, гидрологическое моделирование [22–26]. Особое значение имеет прогноз осадков, однако он весьма затруднен ограниченным пространственно-временным масштабом развития явления [27, 28] и большой пространственно-временной изменчивостью. Как правило, существующей сети постов оказывается явно недостаточно для того, чтобы воспроизвести высокую пространственную изменчивость. Решение проблемы может быть связано с использованием радарных данных об осадках, поскольку они способны обеспечить необходимое пространственное разрешение данных и получение сведений в реальном времени [14].

Увеличить расчетное время между началом осадков и началом паводка можно на основе гидрометеорологической цепочки текущих прогнозов (прогноз осадков + гидрологический прогноз). Благодаря ей заблаговременность прогноза удалось довести до 3 ч [29]. Другие способы прогноза могут быть основаны на пороговых значениях величин (осадки, влажность почв, количество доступных к транспортировке наносов), по достижении которых начнется паводок. Наиболее простой метод — определение суммарного слоя осадков. Для гумидных районов актуальна влажность почвы. Многие методики предполагают комбинированный подход. Для улучшения гидрологических моделей важна доступность гидрологической информации, необходимой для калибровки моделей.

Важная проблема — определение расходов воды, особенно максимальных. Зачастую их оценка проводится уже после паводка с учетом морфометрии русла и на основе идентификации отметок высоких вод [24, 30, 31]. Для воспроизведения гидрографов используются гидрологические модели с распределенными параметрами.

Для характеристики внезапных паводков и применения ландшафтных гидрологических обобщений важное значение имеет распределение физико-географических факторов, в том числе климатических условий. Влияние климата на формирование внезапных паводков проявляется двумя путями [4]: напрямую, через разнообразие характеристик штормов, и косвенно, через сезонность выпадения осадков и характеристики испарения, оказывающие влияние на предшествующее состояние речного бассейна [32]. Кроме того, климатические условия во многом определяют характер развития эрозионных процессов (например, густота речной сети прямо зависит от количества осадков). Для характеристики климатических условий на территории речного бассейна используется классификация М. И. Будыко [33] (отношение испарения и испаряемости к количеству осадков), согласно которой выделяются условия с недостаточной и избыточной увлажненностью.

Влияние физико-географических характеристик проявляется через воздействие рельефа на перераспределение осадков (изменение количества осадков с высотой) и скорость концентрации стока [34, 35]. Для вычисления скорости концентрации стока необходимо знать уклон бассейна, длину склонов и зависимость этих параметров от площади бассейна.

На формирование внезапных паводков влияют также количество и продолжительность осадков. Зависимость между ними для 25 бассейнов на территории Европы позволяет выделить три группы подобных событий [4]: 1) сформированные дождями продолжительностью менее 7 ч и менее 100 мм (характерны для континентального климата); 2) 7–22 ч, 300 мм (Средиземноморье и альпийские бассейны); 3) 34 ч, 700 мм (Средиземноморье). Однако данные события можно отнести и к обычным паводкам (переходная стадия от внезапных к обычным). Внезапные паводки в основном связаны с конвективными осадками мезомасштаба.

Максимальные модули стока обратно пропорциональны площади речных бассейнов. Оценка коэффициентов стока необходима для сравнения различных бассейнов и определения влияния разных



ландшафтных условий на его величину. Максимальные величины коэффициентов стока характеризуют внезапные паводки в средиземноморских областях, что связано с большим количеством осадков, провоцирующих паводок, минимальные — в альпийских бассейнах.

Важное значение для прогноза внезапных паводков имеет также интенсивность осадков и предшествующая влажность почвы [36, 37], однако данное обстоятельство меняется в зависимости от климатического региона. Так, если предшествующие условия были сухие [38, 39], русло становится как бы сцементированным, ограниченно пропускает воду, в результате сток формируется очень быстро и пики максимальных расходов достигают больших значений. В Средиземноморье внезапные паводки возникают в сухих (насыщение  $\leq 0,5$ ) и нормальных (0,5–1,5) условиях, в континентальных областях — в нормальных и влажных ( $\geq 1,5$ ), в альпийско-средиземноморских — при всех предшествующих условиях.

В процессе установления времени добегания паводка ключевым звеном выступает оценка двух параметров: расстояния геометрического центра формирования стока до замыкающего створа бассейна и скорости потока, которая зависит от гидравлических условий, определяемых уклоном русла, морфометрией и шероховатостью.

Мало изучен сток наносов в случае прохождения внезапных паводков [38, 39]. Основная часть проведенных исследований показала, что сток наносов очень существенно возрастает (наблюдается максимальная за период наблюдений мутность), но более точных оценок выноса материала нет.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что внезапные паводки характеризуются крайне высокой скоростью развития и широким распространением на территории земного шара и, как правило, наносят большой урон населению и хозяйственным объектам, их изучение только начинается. Об этом свидетельствует и тот факт, что до сих пор нет единого мнения, что считать внезапным кратковременным бурным паводком. Исследование этих явлений крайне затруднительно, что связано как с малыми пространственно-временными масштабами их развития, так и с тем, что очаги их зарождения в основном приурочены к горным районам, а это значительно осложняет организацию системы мониторинга.

Анализ основных факторов формирования бурных паводков позволяет заключить, что главная причина их возникновения — интенсивные ливни малой продолжительности, сформированные преимущественно в горных районах. В связи с этим предложено называть паводки такого типа внезапными ливневыми паводками.

Учитывая особенности их формирования, основой прогнозирования внезапных паводков выступает прогноз осадков с учетом характеристик рельефа, благоприятствующих быстрой концентрации стока в русле. Большие перспективы в изучении внезапных паводков связаны как с моделированием, так и с применением ландшафтного гидрологического подхода.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (13–05–00162), Государственного фонда естественных наук Китая (14–05–91153) и гранта Президента РФ (МК-5835.2016.5).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шныпарков А. Л., Колтерман П. К., Селиверстов Ю. Г., Сократов С. А., Перов В. Ф. Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2013. — № 3. — С. 42–48.
2. Baburin V. L., Gavrilova S. A., Koltermann P., Seliverstov Yu. G., Sokratov S. A., Shnyarkov A. L. Quantification of economic and social risks of debris flows for the Black Sea coastal region of the Northern Caucasus // Geography, Environment, Sustainability. — 2014. — Vol. 7, N 3. — P. 108–122.
3. Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaškovicová L., Blöschl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irimescu A., Kohnova S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempere-Torres D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis I., Velasco D., Viglione A. A compilation of data on European flash floods // Journ. of Hydrology. — 2009. — N 367 (1–2). — P. 70–78.
4. Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management // Journ. of Hydrology. — 2010. — N 394 (1–2). — P. 118–133.
5. Špitalar M., Gourley J., Lutoff C., Kirstetter P., Brilly M., Carr N. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012 // Journ. of Hydrology. — 2014. — N 519. — P. 863–870.

6. **Creutin J. D., Borga M., Lutoff C., Scolobig A., Ruin I., Creton-Cazanave L.** Catchment dynamics and social response during flash floods: the potential of radar rainfall monitoring for warning procedures // *Meteorol. Appl.* — 2009. — N 16. — P. 115–125.
7. **Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klik A., Rousseva S., Perčec Tadić M., Michaelides S., Hrabalíková M., Olsen P., Aalto J., Lakatos M., Rymaszewicz A., Dumitrescu A., Beguería S., Alewell C.** Rainfall erosivity in Europe // *Science of the Total Environment.* — 2015. — N 511. — P. 801–814.
8. **Barredo J. I.** Major flood disasters in Europe: 1950–2005 // *Natural Hazards.* — 2007. — N 42 (1). — P. 125–148.
9. **Groisman P. Y., Knight R. W., Karl T. R., Easterling D. R., Sun B., Lawrimore J.** Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: trends // *Journ. of Hydrometeorology.* — 2004. — N 5 (1). — P. 64–85.
10. **Groisman P. Y., Knight R. W., Easterling D. R., Karl T. R., Hegerl G. C., Razuvayev V. N.** Trends in intense precipitation in the climate record // *Journ. of Climate.* — 2005. — N 18 (9). — P. 1326–1350.
11. **Huntington T. G.** Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis // *Journ. of Hydrology.* — 2006. — N 319. — P. 83–95.
12. **Merz R., Bloschl G.** A process typology of regional floods // *Water Resources Research.* — 2003. — N 39 (12). — 1340. — 20 p. [Электронный ресурс]. — <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002WR001952/pdf> (дата обращения 27.04.2015).
13. **Iverson R. M.** Debris-flow mechanics // *Debris Flow Hazards and Related Phenomena.* — Heidelberg: Springer-Praxis, 2005. — P. 105–134.
14. **Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M.** Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows // *Journ. of Hydrology.* — 2014. — N 518B. — P. 194–205.
15. **Costa J. E.** Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows // *Flood Geomorphology* / Eds. V. R. Baker, R. C. Kochei, P. C. Patton. — Chichester: John Wiley & Sons, 1988. — P. 113–122.
16. **Creutin J. D., Borga M., Grunfest E., Lutoff C., Zoccatelli D., Ruin I.** A space and time framework for analyzing the human anticipation for flash flood // *Journ. of Hydrology.* — 2013. — N 482. — P. 14–24.
17. **Евгинеев В. М.** Речной сток и гидрологические расчеты. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. — 304 с.
18. **Parajka J., Kohnova S., Balint G., Barbuc M., Borga M., Claps P., Cheval S., Gaume E., Hlavcova K., Merz R., Pfaundler M., Stancalie G., Szolgay J., Bloschl G.** Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine–Carpathian range // *Journ. of Hydrology.* — 2010. — N 394 (1–2). — P. 78–89.
19. **Di Baldassarre G., Montanari A.** Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* — 2009. — N 13 (6). — P. 913–921.
20. **Chagnon S. A.** Urban effects on severe local storms at St. Louis // *Journ. Appl. Meteor.* — 1978. — N 17. — P. 578–586.
21. **Riosalido R.** Estudio meteorológico de la situación del 7 de agosto de 1996 (Biescas). — Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 1997. — 90 p.
22. **Creutin J. D., Borga M.** Radar hydrology modifies the monitoring of flash flood hazard // *Hydrological Processes.* — 2003. — N 17 (7). — P. 1453–1456.
23. **Carpenter T. M., Taylor S. V., Georgakakos K. P., Wang J., Shamir E., Sperflage J. A.** Surveying flash flood response in mountain streams // *Eos Trans. AGU.* — 2007. — N 88 (6). — P. 69–72.
24. **Gaume E., Borga M.** Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations // *Journ. of Flood Risk Management.* — 2008. — N 1 (4). — P. 175–189.
25. **Costa J. E., Jarrett R. D.** An evaluation of selected extraordinary floods in the United States reported by the US geological survey and implications for future Advancement of Flood Science // *US Geological Survey, Scientific Investigations Report.* — 2008. — N 5164. — 52 p.
26. **Bouilloud L., Delrieu G., Boudevillain B., Kirstetter P. E.** Radar rainfall estimation in the context of post-event analysis of flash floods // *Journ. of Hydrology.* — 2009. — N 394 (1–2). — P. 17–27.
27. **Krajewski W. F., Smith J. A.** Radar hydrology: rainfall estimation // *Advances in Water Resources.* — 2002. — N 25 (8–12). — P. 1387–1394.
28. **Bouilloud L., Delrieu G., Boudevillain B., Kirstetter P. E.** Radar rainfall estimation in the context of post-event analysis of flash floods // *Journ. of Hydrology.* — 2010. — N 394 (1–2). — P. 17–27.
29. **Rossa A. M., Laudanna Del Guerra F., Borga M., Zanon F., Settin T., Leuenberger D.** Radar-driven high-resolution hydro-meteorological forecasts of the 26 September 2007 Venice flash flood // *Journ. of Hydrology.* — 2010. — N 394 (1–2). — P. 230–244.
30. **Borga M., Gaume E., Creutin J. D., Marchi L.** Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes // *Hydrological Processes.* — 2008. — N 22 (18). — P. 3883–3885.
31. **Marchi L., Borga M., Preciso E., Sangati M., Gaume E., Bain V., Delrieu G., Bonnifait L., Pogacnik N.** Comprehensive post-event survey of a flash flood in Western Slovenia: observation strategy and lessons learned // *Hydrological Processes.* — 2009. — N 23 (26). — P. 3761–3770.
32. **Sivapalan M., Bloschl G., Merz R., Gutknecht D.** Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality // *Water Resources Research.* — 2005. — N 41 (6). — 17 p. [Электронный ресурс]. — [http://www.hydro.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-hydro/Publikationen/bloeschl/2005\\_Sivapalan\\_WRR.pdf](http://www.hydro.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-hydro/Publikationen/bloeschl/2005_Sivapalan_WRR.pdf) (дата обращения 22.04.2015).

33. **Будыко М. И.** Климат и жизнь. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 472 с.
34. **Costa J. E.** Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States // Journ. of Hydrology. — 1987. — N 93. — P. 313–338.
35. **O'Connor J. E., Costa J. E.** Spatial distribution of the largest rainfall-runoff floods from basins between 2.6 and 26,000 km<sup>2</sup> in the United States and Puerto Rico // Water Resources Research. — 2004. — N 40 (1). — 11 p. [Электронный ресурс]. — <http://water.usgs.gov/nsip/pubs/Oconnor-Costa-floods.pdf> (дата обращения 25.04.2015).
36. **Gaume E., Livet M., Desbordes M., Villeneuve J.-P.** Hydrologic analysis of the Aude, France, flash-flood 12 and 13 November 1999 // Journ. of Hydrology. — 2004. — N 286 (1–4). — P. 135–154.
37. **Borga M., Boscolo P., Zanon F., Sangati M.** Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 flash flood in the eastern Italian Alps // Journ. of Hydrometeorology. — 2007. — N 8 (5). — P. 1049–1067.
38. **Cohen H., Laronne J. B., Reid I.** Simplicity and complexity of bed load response during flash floods in a gravel bed ephemeral river: A 10 year field study // Water Resources Research. — 2010. — N 46. — 14 p. [Электронный ресурс]. — <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010WR009160/pdf> (дата обращения 26.04.2015).
39. **Cohen H., Laronne J. B.** High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel // Hydrological Processes. — 2005. — N 19. — P. 1687–1702.

*Поступила в редакцию 2 августа 2015 г.*

---