

УДК 627.511
DOI: 10.7868/S25000640210104

ФАКТОРЫ ПАВОДКОВОЙ ОПАСНОСТИ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

© 2021 г. И.В. Шевердяев¹, А.В. Клещенков², С.А. Мисиров²

Аннотация. Работа посвящена оценке паводковой опасности водосборов рек Северо-Западного Кавказа на основе анализа распределения водорегулирующих свойств на водосборах основных речных систем. Рассмотрено распространение на исследуемой территории растительного и почвенного покрова и выполнена оценка его водорегулирующих свойств. Неоднородность почв и растительности приводит к значительной изменчивости в пространстве дренажных и водоудерживающих свойств водосборов. При достаточно хорошей изученности почв Северо-Западного Кавказа, их гранулометрического состава и дренажных свойств и, как следствие, гидрологической роли в целом отмечена необходимость проведения дополнительных исследований влияния лесов на преобразование осадков в сток. Приведено описание влияния морфометрических характеристик водосборных бассейнов на формирование паводочного стока. Предложен метод сравнения паводковой опасности водосборов между собой на основе пространственного анализа в геоинформационной системе паводкообразующих свойств водосборов. С учетом выполненных оценок скоростей добегания и анализа цифровых моделей местности были рассчитаны гистограммы распределения площадей подбассейнов на водосборе по времени добегания с них стока до замыкающего створа. На основе гистограмм были рассчитаны гидрографы для замыкающих створов выделенных подбассейнов. Установлено, что все исследованные водосборы разделяются на водосборы с одним пиком расходов и несколькими. При этом однопиковые водосборы, как правило, имеют меньшую площадь и вследствие этого более простое строение. Для них наблюдается прямая зависимость площади от максимального расхода, а также площади от времени между максимумами осадков и расходов. Зависимость времени между максимумами осадков от максимальных расходов выражена слабо и у однопиковых, и у многопиковых водосборов, причем для многопиковых водосборов черноморского побережья наблюдается даже обратная зависимость.

Ключевые слова: Северо-Западный Кавказ, дождевые паводки, паводковая опасность, растительность Кавказа, внезапные паводки.

FACTORS OF FLOOD HAZARD OF RIVERS OF THE NORTH-WEST CAUCASUS

I.V. Sheverdyayev¹, A.V. Kleshchenkov², S.A. Misirov²

Abstract. The paper is devoted to assessing the flood hazard of river catchments in the North-West Caucasus based on the distribution of water-regulating properties in the catchments of the main river systems. The distribution of vegetation and soil cover in the study area is considered and their water-regulating properties are evaluated. Heterogeneity of soils and vegetation leads to significant variability in the space of drainage and water-retaining properties of catchments. In the conditions of sufficiently well-studied soils of the North-West Caucasus, their granulometric composition and drainage properties, and as a result, the hydrological role in general, it is necessary to conduct additional research on the influence of forests on the conversion of precipitation into runoff. The article describes the influence of morphometric characteristics of watersheds on

¹ Федеральний дослідницький центр Субтропічний научний центр Російської академії наук (Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russian Federation), Російська Федерація, 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, e-mail: ig71089@yandex.ru

² Федеральний дослідницький центр Південний научний центр Російської академії наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Російська Федерація, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

the formation of flood runoff. Generalizations of the influence of flood-forming properties of catchments are made, and a method for comparing the flood hazard of catchments with each other is proposed based on spatial analysis in a geoinformation system. Based on the estimates of run-off rates and the analysis of digital terrain models, histograms of the distribution of areas in the catchment area by the time of run-off from them to the closing gate were calculated, and hydrographs for the closing gates of the selected catchments were calculated on the basis of histograms. As a result of the research, it was found that all the studied catchments are divided into catchments with one peak of expenditure and several ones. In this case the single peak of the watershed, tend to have a smaller area, and consequently a more simple structure. They have a direct relationship between the area and the maximum flow rate, as well as the area and time between the maximum precipitation and expenditure. The time dependence between maximum precipitation and maximum expenditure is weakly expressed in both single-peak and multi-peak catchments, and even the reverse relationship is observed in multi-peak catchments of the southern macro-slope.

Keywords: North-West Caucasus, rainfall flood, flood risk, vegetation of the Caucasus, flash flood.

ВВЕДЕНИЕ

Северо-Западный Кавказ в настоящее время – быстро развивающийся регион, занимающий ключевые позиции во многих отраслях: рекреационной, транспортной, сельскохозяйственной. Одной из особенностей Северо-Западного Кавказа, сильно влияющих на его развитие, является паводковый режим рек. Слабое внимание к паводковой опасности при освоении региона может привести к существенному материальному ущербу, сопровождающемуся человеческими жертвами. В XXI веке паводки с наибольшими последствиями наблюдались в 2002 и 2012 гг. В 2002 г. паводок охватил как реки Северо-Западного Кавказа, так и весь бассейн Кубани, а также Терека [1]. Один из крупнейших в регионе паводок 6–7 июля 2012 г. отличался не только масштабами материального ущерба, но и повышенным вниманием научного сообщества. Он стал одним из самых хорошо изученных: был выпущен отчет Росгидромета [2], в котором рассматривалось развитие паводка, опубликованы монографии и статьи специалистами Института водных проблем РАН [3], Института географии РАН [4], Московского государственного университета [5], Южного научного центра Российской академии наук [6].

Паводковый режим рек Северо-Западного Кавказа обусловлен физико-географическими условиями региона: отсутствием оледенения, значительно снежного покрова вкупе с особенностями орографии и выпадением ливневых осадков. Малые, а порой и пересыхающие в меженный период реки за несколько дождливых часов превращаются в бурные потоки, сопровождающиеся скачками уровней (до 10 м) и затоплением речных долин. За последние 50 лет все районы Краснодарского края, расположенные на территории Северо-Западного Кавказа,

подвергались воздействию опасных паводков [7], которые отличались интенсивностью и причинами формирования и привели к разнообразному ущербу на различных водосборах. В рамках работы [8] был проведен анализ наводнений на Черноморском побережье Северо-Западного Кавказа: рассмотрена повторяемость различных типов наводнений, а также показан небольшой рост частоты опасных паводков со второй половины XX века.

Географическая компактность региона обуславливает схожие синоптические условия формирования паводков. Поэтому различия в паводковой опасности разных водосборов определяются прежде всего водорегулирующими свойствами конкретных водосборов – особенностями растительного и почвенного покрова, орографии, строения речных бассейнов. В настоящей работе мы предпринимаем попытку оценить паводковую опасность рек Северо-Западного Кавказа на основе анализа водорегулирующих свойств водосборов основных речных систем.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОСАДКОВ В ПАВОДКОВЫЙ СТОК

Для многолетнего периода в уравнении водного баланса замкнутого водосбора приходная часть упрощается до разности осадков и испарения [9]. Это значит, что все гидрологические процессы зависят от того, как под воздействием конкретных условий, определяемых свойствами водосбора, осадки трансформируются в основные элементы речного стока: поверхностный и подземный сток. Частным случаем поверхностного стока является дождевой паводок – скачок расходов и уровней воды в реках вследствие выпадения интенсивных жидких осадков. Рассмотрим процессы преобразования осадков (исключая снег) в сток на водосборе (рис. 1).

При выпадении осадков объем воды распределяется на перехват и потребление растительным покровом, инфильтрацию в почву, накопление на земной поверхности. Накопленная на земной поверхности вода по возможности стекает вниз по склону либо образует сеть стоячих водоемов (луж) с последующим испарением и просачиванием в почву. Объем стекающей вниз по склону воды, сливаясь на водосборе, образует поверхностный сток. Доля от объема выпавших осадков, составляющая поверхностный сток, определяется состоянием растительного и почвенного покрова, а также особенностями рельефа местности. При большом объеме поверхностный сток может формировать дождевой паводок, обуславливать скачки уровней и расходов на реках водосбора. Расходы, превышающие пропускную способность речных русел, выражаются в затоплении окружающих русла пойм и вообще речных долин, становясь причиной материального ущерба и, возможно, человеческих жертв. Затопление пойменной части речной долины может повлечь за собой геоморфологические изменения (размыв одних форм рельефа и образование других), вовлечь в паводковый речной поток дополнительный терригенный материал, бытовой и растительный мусора. Это приводит к увеличению вязкости водного потока с возможным развитием его до состояния водокаменных потоков и селя (при вязкости более 1,1 т/м³), опасность которого для хозяйств в горных и предгорных условиях, как правило, концентрирующихся у русел рек, еще больше. Для формирования селя необходимы источники большого объема терригенного материала на водосборе, это дополнительный фактор, усиливающий опасность паводков. Основным процессом вовлечения больших объемов терригенного материала является их смыв поверхностным стоком, определяемый скачком расходов и уровней воды в реках и временных водотоках, поэтому мы не будем останавливаться на факторах селеобразования, а уделим большее внимание факторам формирования именно паводочного стока. Строение речного бассейна может как усиливать паводковые скачки расхода и уровня на реках – если скачки расходов сливающихся притоков по времени накладываются друг на друга при слиянии, – так и снижать их, приводя к распределению скачков на притоках равномерно по времени.

Далее мы рассмотрим водорегулирующие свойства отдельно растительного и почвенного покровов как определяющие объем поверхностного

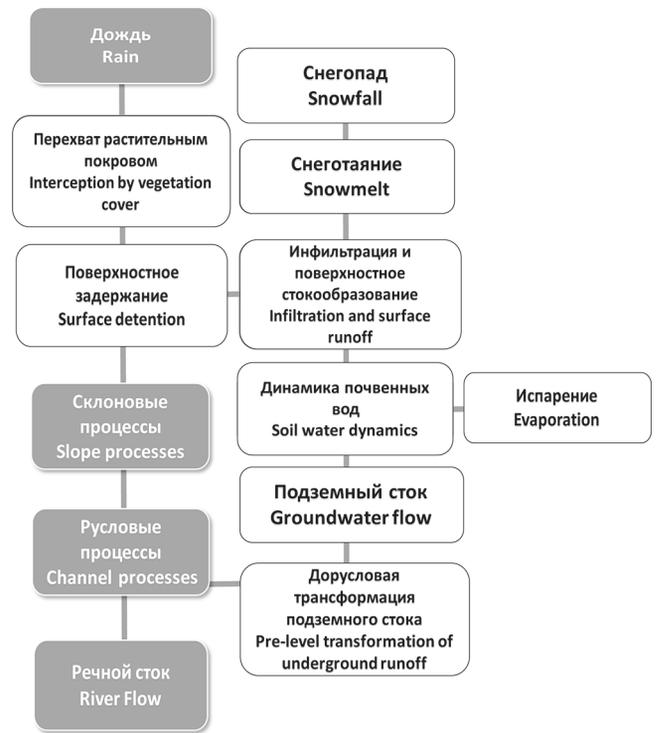


Рис. 1. Процессы преобразования жидких осадков в сток на водосборе.

Fig. 1. Processes of conversion of liquid precipitation to runoff in the catchment area.

стока, спровоцированного дождями, а также роль строения речных водосборов как фактор распределения локальных скачков водности на водосборе по времени.

ПАВОДКООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ВОДОСБОРА

Водорегулирующие свойства растительного покрова. Растительный покров, закрывающий земную поверхность от непосредственного поступления выпадающих осадков, играет существенную роль в гидрологическом цикле. В начале дождя происходит увлажнение верхней части растительного покрова (кроны деревьев, кустарники либо травяной покров). В течение дождя увлажнение распространяется сверху вниз по ярусам растительного покрова. При этом некоторая часть выпавшей воды впитывается листвой, ветвями, стволами; другая параллельно дождю испаряется; третья накапливается на поверхности растений, не стекая к земной поверхности и обеспечивая испарение в последующее время. В общем виде эти процессы представлены в концептуальной модели перехвата осадков растительностью Раттера (рис. 2). Соотношение

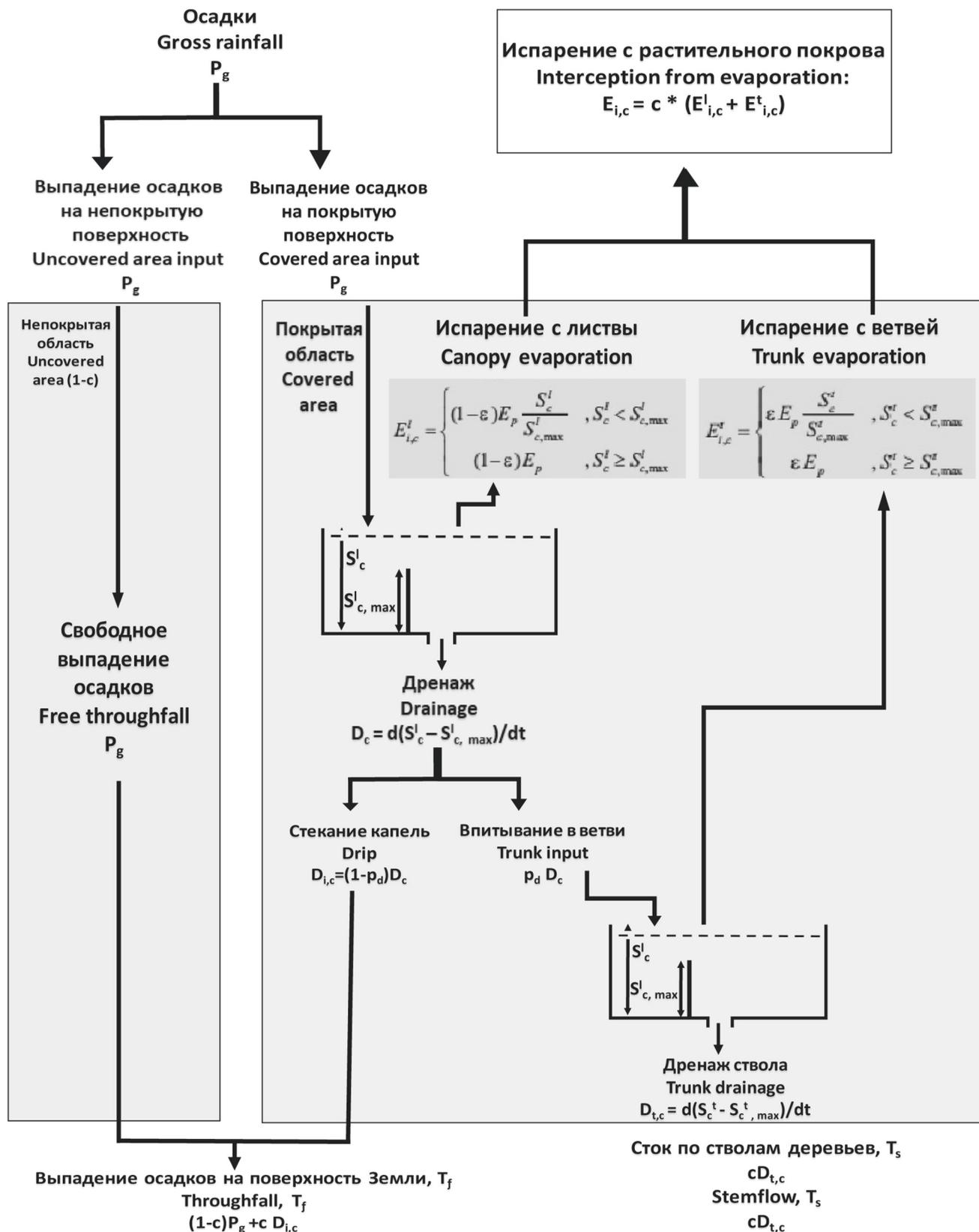


Рис. 2. Концептуальная модель перехвата осадков растительностью Раттера.
 Fig. 2. Conceptual framework of the revised Rutter model.

частей объема выпавшей воды для каждого такого процесса может сильно варьировать в зависимости от характера растительности (в том числе видового состава), сезона, конкретных метеоусловий, и его определение без инструментального измерения затруднено. Так, в статье [10] показано, что для одних и тех же видов растений измеренные объемы задержанной листвой воды и доля испаренной воды в разных работах сильно отличаются.

В общем виде перехват воды растительностью в гидрологическом цикле выполняет три функции: снижение объема поступившей на поверхность земли воды, перераспределение воды в пространстве и перераспределение воды по времени. Снижение объема поступающей на поверхность земли дождевой воды обеспечивается расходом ее на испарение с поверхности листвы, ветвей, стволов, травы и на впитывание самими растениями. Для различных типов лесов в зависимости от их густоты, видового состава, количества ярусов, времени года (особенно для широколиственных лесов) этот объем сильно меняется. Так, по данным работы [11] следует, что в годовом выражении перехват растительностью дождевых осадков для хвойных лесов изменяется в пределах 19–45 %, широколиственных лесов – 19–30 %, смешанных – 14–19 %, тропических дождевых лесов – 9–32 %. Однако в разрезе одного дождя перехват воды растительностью определяется прежде всего интенсивностью осадков. Но можно выделить такую связь: чем более густой и многоярусный растительный покров, тем больший объем дождевых осадков он может задержать для испарения и потребления. Перераспределение воды в пространстве из-за перехвата растительностью зависит от строения крон деревьев и их распределения в лесном массиве и в целом играет локальную роль, нивелирующуюся при рассмотрении процессов формирования стока в масштабах всего водосбора. Перераспределение растительностью выпавшей дождевой воды по времени заключается в том, что достижение водой поверхности земли происходит после некоторой степени увлажнения кроны деревьев и растягивается во времени в результате стекания с листвы капель, продолжающегося и после прекращения дождя. Таким образом растительный покров снижает, сглаживает, смещает и растягивает во времени пик осадков перед пополнением воды на поверхность земли.

При прохождении же паводков растительность является фактором, увеличивающим шероховатость поверхности, а значит, уменьшающим ско-

рость водных потоков (как руслового, так и склонового). Растительность в русле сильно снижает пропускную способность, провоцирует выход рек из берегов, а при попадании фрагментов растительности в поток (от травы и листьев до целых деревьев) приводит к увеличению его вязкости.

Водорегулирующие свойства почв. В формировании паводков почвенный покров, как и растительность, играет роль водоудерживающей емкости, которая начинает наполняться при выпадении осадков на ее поверхность. В дальнейшем вода из нее расходуется на внутрисочвенный сток, на грунтовые воды и др. Структура и гранулометрический состав определяют водно-физические свойства почв: водопроницаемость (способность почвы впитывать и пропускать через себя воду), водоудерживающую способность. Наиболее водопроницаемы песчаные почвы, наименее – глинистые [12]. Водопроницаемость зависит от механического состава, структуры (у структурных почв выше, чем у бесструктурных), содержания гумусовых веществ (в целом от общего объема пор в почве и их размера), а также от состава поглощенных катионов (натрий уменьшает водопроницаемость, кальций увеличивает). В легких по механическому составу почвах поры крупные и водопроницаемость всегда высокая. В почвах с тяжелым механическим составом, с глыбисто-пылеватой структурой и в плотных бесструктурных почвах водопроницаемость низкая. После оструктурирования такие почвы в несколько раз улучшают фильтрационную способность (суглинистые и глинистые почвы, обладающие водопроходной комковато-зернистой структурой, также отличаются высокой водопроницаемостью).

Хорошо водопроницаемыми считаются почвы, в которых вода в течение первого часа проникает на глубину до 15 см. В средневодопроницаемых почвах вода за первый час проходит от 5 до 15 см, а в слабоводопроницаемых – до 5 см.

Влагоемкость – способность почвы впитывать и удерживать определенное количество воды [13]. Выражается в процентах к весу сухой почвы. Эта способность зависит от гранулометрического состава, содержания гумуса, состава поглощенных катионов. Высокая влагоемкость характерна для глинистых почв, богатых коллоидами, с высоким содержанием гумуса. Высокой влагоемкостью обладают почвы, содержащие известь и хлориды.

Строение речных водосборов. Влияние формы водосборов на речной сток, в особенности на формирование паводковой волны, рассматривается

в гидрологических исследованиях еще с середины XX века [14; 15].

Развитие вычислительных, геоинформационных и модельных мощностей позволяет перейти от изучения связи таких параметров, как ширина водосбора, вытянутость, коэффициент формы водосбора, длина гидрографической сети и пр. к рассмотрению гистограмм распределения площадей водосбора и их влияния на формирование гидрографа в замыкающем створе [16]. Форма водосбора определяет условия, при которых стоки притоков, сливаясь к замыкающему створу, накладываются друг на друга, усиливая тем самым паводочный пик, либо идут последовательно, в результате чего в замыкающем створе пик сильно сглаживается.

Большое влияние на процессы формирования стока оказывает размер водосборного бассейна. Чем больше величина бассейна, тем больше проявляется его роль как регулятора стока. В пределах большого бассейна разнообразнее количество и режим поступления дождевых вод. Также с увеличением размеров бассейна возрастает длина путей движения воды по русловой сети, увеличиваются разнообразие скоростей движения и время добегания воды через толщу почв и горных пород, растет глубина вреза русла и относительный объем подземного стока.

ОСОБЕННОСТИ ПАВОДКООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ НА ВОДОСБОРАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Влияние растительного покрова на формирование паводков на реках Северо-Западного Кавказа. На Северо-Западном Кавказе растительный покров представлен в предгорной части степями, а в горной части – дубовыми, к востоку с повышением рельефа – буковыми и буково-грабовыми лесами с очагами смешанных и сосновых лесов на более высоких участках водораздельных хребтов. Нижняя граница леса в регионе колеблется на высоте около 100 м.

Дубовый лес обладает хорошими по сравнению с лугами и степями водоудерживающими способностями, однако уступает буковому лесу. Наиболее густо дуб произрастает на освещенных склонах хребтов. Вдоль берега между Новороссийском и Геленджиком преобладает можжевельное аридное редколесье, в котором доминирует можжевельник,

дуб пушистый, держидерево. В районе Горячего Ключа встречаются массивы каштановых лесов.

Растительные сообщества в условиях горной и предгорной местности определяются не только широтным расположением, но и высотной зональностью. Этим объясняется преобладание на территории региона лесной растительности вместо степей. Только долины рек северного макросклона Северо-Западного Кавказа (левые притоки Кубани) в своей равнинной части покрыты степной растительностью Азово-Кубанской низменности, в настоящее время сильно распаханной. Однако здесь также развиваются интразональные пойменные прибрежные леса вдоль рек (тугайные леса).

Нижнегорная растительность черноморского побережья существенно изменяется с запада на восток по мере увеличения годовой нормы атмосферных осадков. От Анапы до Туапсе на побережье преобладают сухие дубово-грабовые леса. Южные склоны, выходы известняков, осыпи занимают шибляковые формации ксерофитов. На приморских склонах в зоне импульверизации морских солей сохранились реликтовые сосняки с доминированием сосны пицундской или локальные массивы сосны крымской, однако их площади произрастания невелики.

На нижних частях склонов, расчищенных от леса, развиваются бобово-злаковые разнотравные залежи, отличающиеся невысоким, но густым (проективное покрытие 0,7–0,9) травостоем. На 30–40 % он состоит из бобовых, также развиты злаки, разнотравье. В лесных расчистках на сланцевых песчаниковых хребтах развиваются крупнотравные вейнико-разнотравные луга, отличающиеся высоким травостоем (1–1,5 м) [17].

Водоохранная и водорегулирующая роль дубовых и буковых лесов на Северо-Западном Кавказе описана в работе [18]. Средние величины перехвата осадков при осадках 10 мм и выше составляют 2 мм с ростом до 5 мм.

Для малых водосборов впитывание очень динамично и определяется степенью предшествующего увлажнения. При этом паводкообразующими могут стать ливни различной интенсивности. Опыты по дождеванию буковых лесов в бассейне р. Мзымты показали величины впитывания 0,07–0,08 мм/мин.

Дубовые леса по сравнению с буковыми обладают меньшей способностью регулировать паводочный сток. Установлено, что глубина слоя быстрого впитывания в дубовых лесах в 3 раза меньше, чем

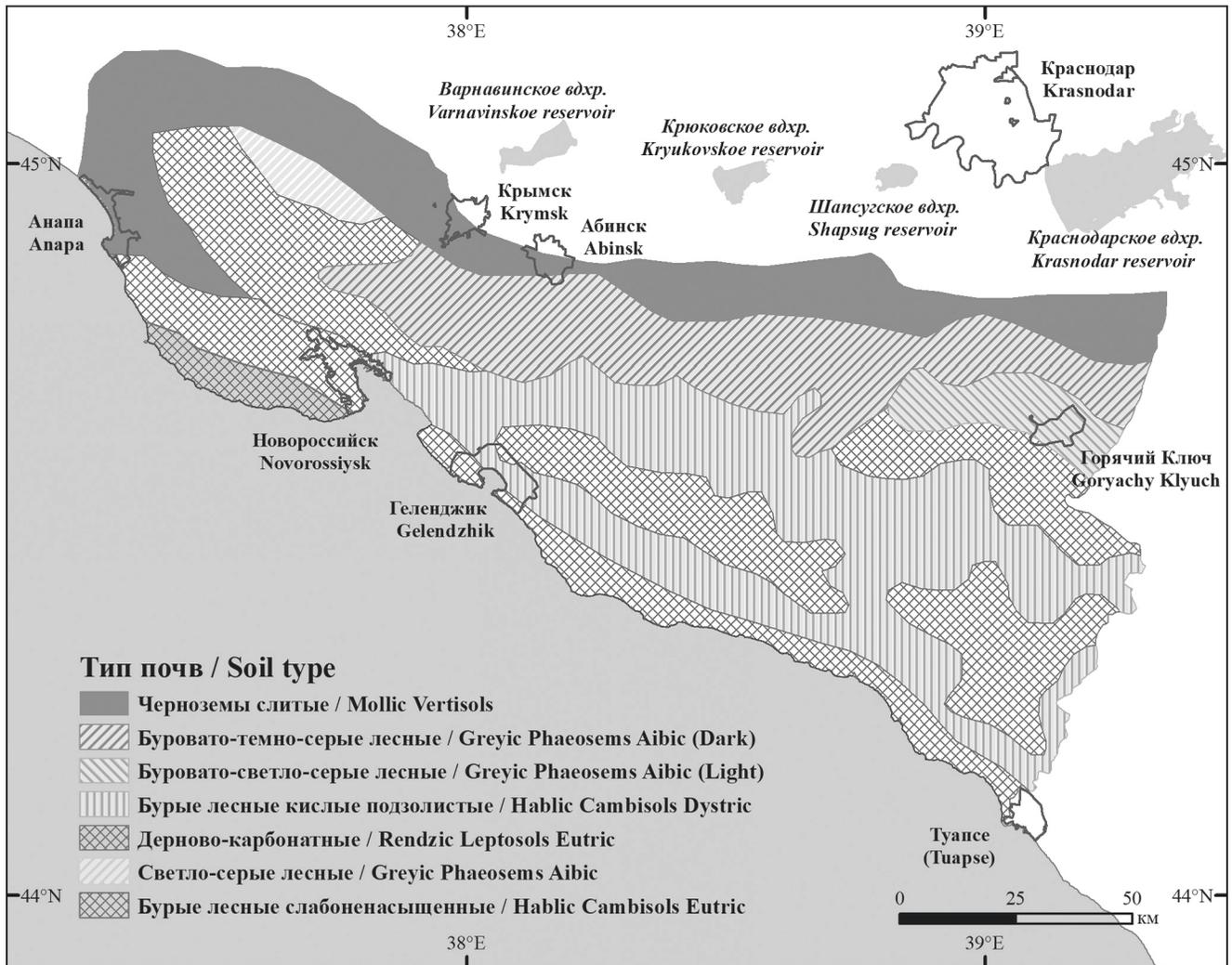


Рис. 3. Почвы Северо-Западного Кавказа.
 Fig. 3. Soils of the North-West Caucasus.

в буковых [18]. Свободная гравитационная влага наиболее проницаемой части почвенного профиля в букняках составляет 97 мм, а в дубравах 28 мм, что в 3,5 раза меньше.

В целом же стоит отметить, что влияние лесов региона на преобразование осадков в сток изучено достаточно слабо и в настоящее время не позволяет установить достоверные коэффициенты для пространственного моделирования формирования паводков.

Влияние почвенного покрова на формирование паводков на реках Северо-Западного Кавказа. Почвы региона в центральной части горной системы представлены бурыми лесными. К ним с севера примыкают темно-серые и серые лесные и с юга дерново-карбонатные почвы (рис. 3). На равнинной территории формируются лугово-черноземные почвы. В долинах рек представлены аллюви-

альные луговые почвы. Среди почв региона серые лесные почвы обладают малой водопроницаемостью и подвержены водной эрозии. Бурые лесные почвы обладают промывным режимом и хорошим вертикальным дренажем. Высокая фильтрационная способность верхних горизонтов бурых лесных почв способствует хорошему поглощению осадков и переводу их во внутрипочвенный боковой сток. Высокой водоудерживающей способностью также обладают дерново-карбонатные почвы.

Серые лесные почвы формируются под дубовыми лесами с развитым подлеском и травяным покровом. Преобладают тяжелосуглинистые и суглинистые серые лесные почвы. Серые почвы более рыхлые и более легкие, чем темно-серые [19].

Бурые лесные почвы обладают промывным режимом, имеют хороший вертикальный внутрипочвенный дренаж. Верхние горизонты характеризу-

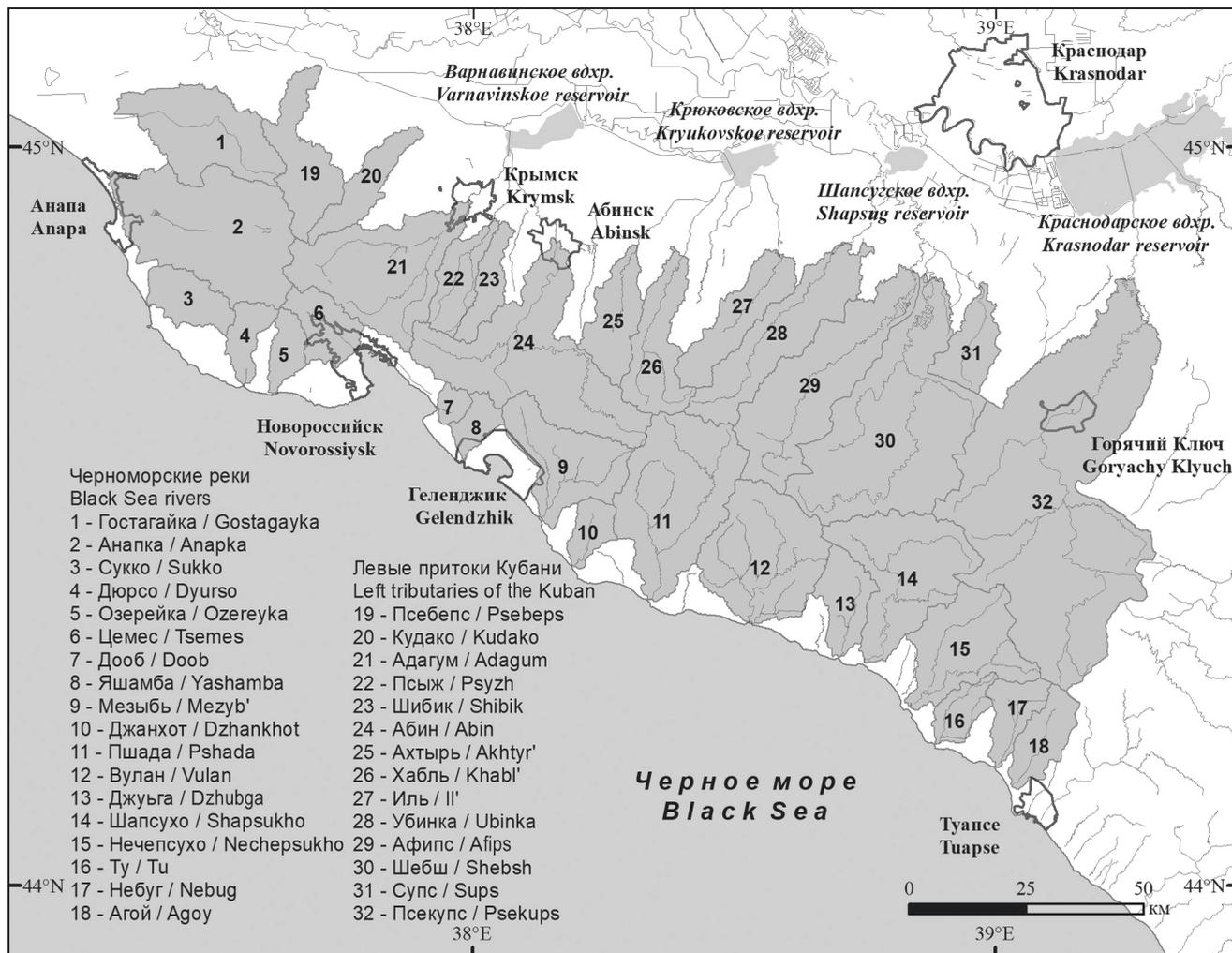


Рис. 4. Гидрографическая сеть и крупнейшие водосборы региона.

Fig. 4. Hydrographic network and major catchments of the region.

ются низкими величинами плотности и высокой порозностью, с глубиной плотности почвы увеличивается, порозность же снижается. Водопроницаемость этих почв в верхних горизонтах высокая и очень высокая и коррелирует с величинами плотности и порозности. Величины фильтрационной способности выше 0,5 мм/мин обеспечивают впитывание сильных осадков. Высокая фильтрационная способность верхних горизонтов способствует высокому поглощению осадков и переводу их во внутрипочвенный сток. Бурые лесные почвы могут пропускать влагу умеренных и сильных дождей (до 0,5 мм/мин) без формирования поверхностного стока [19].

Дерново-карбонатные почвы формируются в условиях повышенного увлажнения. Они обладают хорошей структурированностью, рыхлым и слабоуплотненным сложением. Это приводит к высокой

водоудерживающей способности. Поверхностные горизонты могут удерживать 33–44 % влаги. Предельная влагоемкость может достигать 33 %. Порозность составляет 35–42 % от объема почвы и возрастает с глубиной [19].

Таким образом, наиболее промывными являются бурые лесные и дерново-карбонатные почвы, затем темно-серые и серые лесные. Распространение промывных почв в верховьях рек обуславливает стабильный сток рек при выпадении несильных осадков и преобразование осадков во внутрипочвенный сток. В то же время растительный покров при преобладании дубовых лесов с развитым подлеском и травяным покровом также способствует поглощению влаги при выпадении несильных осадков. Для формирования паводков для большей части региона необходимо выпадение высокоинтенсивных осадков (более 0,5 мм/мин) на достаточ-

но большой территории в течение продолжительного времени.

Особенности гидрографической сети, влияющие на формирование паводков в регионе. Гидрографическая сеть Северо-Западного Кавказа обусловлена орографическим строением территории. Бассейны в горной части состоят из нескольких элементов. Водотоки, текущие по дну межгорных котловин, принимают короткие водные потоки справа и слева непосредственно с горных склонов. Слияния таких водотоков прорезают северные или южные окружающие хребты, а затем принимают другие собирающие потоки, текущие по дну межгорных котловин. Таким образом, образуются достаточно большие по площади речные бассейны, которые обладают повышенной паводковой опасностью. Следует отметить, что такое строение

бассейнов характерно как для северного макросклона Северо-Западного Кавказа, так и для южного (рис. 4). В связи с этим наводнения в регионе случаются как на черноморском побережье, так и в кубанских станицах при выходе рек из берегов на равнину.

**МЕТОД СРАВНЕНИЯ
ПАВОДКОВОЙ ОПАСНОСТИ ВОДОСБОРОВ**

Мы предлагаем оценить паводковую опасность водосборов на основе анализа описанных выше паводкообразующих свойств: растительности, почв, а также формы и строения водосборов. Для этого было смоделировано формирование паводков на крупнейших водосборах Северо-Западного Кавказа при интенсивности осадков, зафиксированной в по-

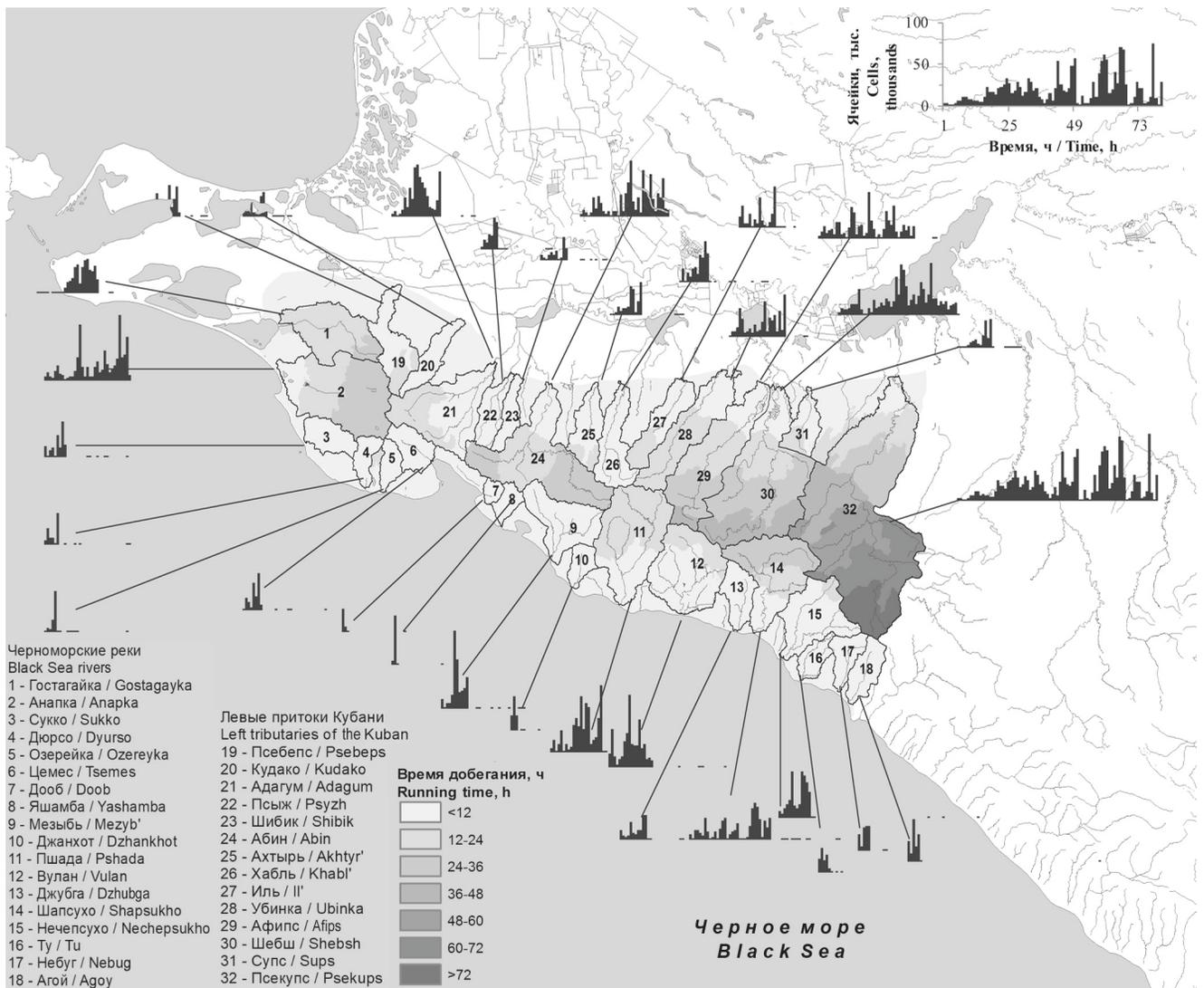


Рис. 5. Распределение площадей на водосборах по времени добегания.
Fig. 5. Distribution of areas in catchments by reach time.

часовых наблюдениях в Крымске 6–7 июля 2012 г., приводимой в источнике [2].

Построение гидрографов производилось со следующими условиями:

1) осадки равномерно распределены на всей территории Северо-Западного Кавказа, благодаря чему возможно сравнить реакции свойств водосборов на их выпадение;

2) эффективные осадки составляют 80 % от выпавших осадков на протяжении всего расчетного времени, при этом уравниваются способности водосборов удерживать выпадающие осадки;

3) осадки моментально формируют поверхностный сток;

4) скорости добегания воды принимаются постоянными;

5) не учитывается влияние на прохождение паводков существующих водохранилищ.

Для построения гидрографов водосборов использована цифровая модель местности (ЦММ) на основе съемки SRTM с разрешением 1 угловая секунда (на широтах Кавказа это около 30 м). Для расчета скорости добегания для каждой ячейки ЦММ применялись следующие уравнения [20]:

$$v = a_{cp} Q_{1\%}^{0,25} i_{cp}^{0,33},$$

$$a_{cp} = 0,15 \left(\frac{1}{20n} \right)^{0,75},$$

$$Q_{1\%} = q'_{1\%} \phi H_{1\%} \delta A,$$

$$q'_{1\%} = q_{1\%} / \phi H_{1\%},$$

$$q_{1\%} = \frac{B}{\sqrt{A}},$$

$$Q_{1\%} = B \delta \sqrt{A},$$

$$\delta = 1 / (1 + C_0 A_{oz}),$$

где v – скорость добегания для ячейки ЦММ; a_{cp} – средневзвешенная шероховатость поверхности; $Q_{1\%}$ – максимальный расход, 1 % вероятности; i_{cp} – средневзвешенный уклон, ‰; n – коэффициент шероховатости по шкале Срибного, который зависит от типа растительности; $q'_{1\%}$ – относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P = 1\%$; ϕ – сборный коэффициент стока; $H_{1\%}$ – максимальный суточный слой осадков вероятности превышения $P = 1\%$; δ – коэффициент, учитывающий снижение максимальных расходов воды в залесенных

бассейнах; A – площадь водосбора реки; B – географический параметр, для данного региона принимается за 60; C_0 – коэффициент, принимаемый для лесной зоны (0,2); A_{oz} – коэффициент озерности водосбора.

Исходя из представленных уравнений для расчета скорости добегания были построены растры распределения по ячейкам ЦММ n (параметра шероховатости поверхности), A_{oz} (озерности водосбора ячейки), i_{cp} (средневзвешенного уклона ячейки), A (площади водосбора ячейки). По скоростям добегания и цифровым моделям местности были рассчитаны гистограммы распределения площадей на водосборе по времени добегания с них стока до замыкающего створа (рис. 5). На основе гистограмм построены гидрографы для замыкающих створов выделенных водосборов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Паводковая опасность водосборов рек Северо-Западного Кавказа. Опасность паводков определяется характеристиками затопления (площадями, глубиной, скоростью потока, продолжительностью затопления), которые приводят к ущербу на водосборе, и временем наступления паводка, которое накладывает ограничения на эвакуационные меры во время паводка. Поэтому среди характеристик гидрографов в качестве показательных выделены максимальные расходы на замыкающем створе, время между наступлением максимума осадков и максимума расхода (то есть время между выпадением наибольшего часового слоя осадков и наступлением пика расхода воды в замыкающем створе исследуемого бассейна) и соотношение этих параметров. Основные различия крупнейших рек представлены на рисунке 6 и в таблице 1.

Если рассматривать водосбор р. Адагум, использованный при расчетах осадков, как референтную модель (максимум расхода 1275 м³/с при наступлении через 12 часов после пика осадков), то схожими можно признать на северном макросклоне Северо-Западного Кавказа водосборы Абина, Шебша и Псекупса. При этом следует учитывать, что площади водосборов растут к востоку при соответствующем росте временного интервала между пиками осадков и расходов. На южном макросклоне схожими с Адагумом водосборами обладают реки Адербиевка (в устье расположен Дивноморск), Пшада (Криница), Вулан (Архипо-Осиповка), Нечепсухо (Новомихайловский).

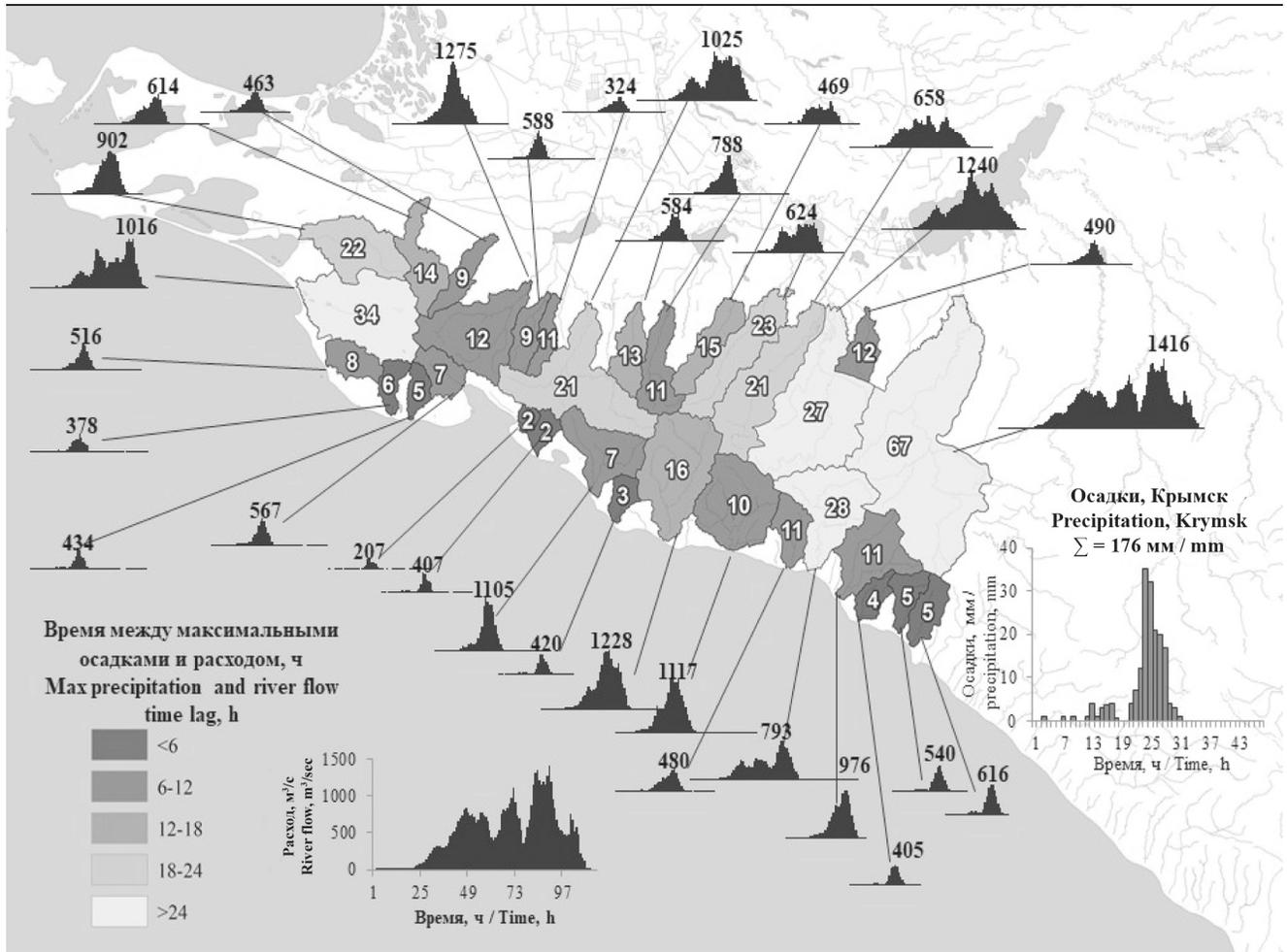


Рис. 6. Рассчитанные гидрографы паводков.
Fig. 6. The calculated flood hydrographs.

На основе рисунка 6 можно выделить водосборы с одним пиком расходов (на северном макросклоне Северо-Западного Кавказа это Кудако, Псыж, Ахтырь, Хабль, Супс, на южном – Гостагайка, Сукко, Дюрсо, Озерейка, Цемес, Дооб, Яшамба, Джанхот, Джубга, Нечепсухо, Ту, Небуг, Агой) и с несколькими (Псебепс, Адагум, Шибик, Абин, Иль, Убинка, Афипс, Шебш и Псекупс на северном и Анапка, Мезыбь, Пшада, Вулан, Шапсухо на южном). Зависимости между площадями водосборов, максимальными расходами, временем между максимумами осадков и расходов представлены на рисунке 7 для четырех групп водосборов: однопиковых и многопиковых северного и южного макросклонов. Для всех выделенных групп наблюдается прямая связь между площадью водосбора и максимальными расходами. Время между максимумами осадков и расходов, характеризующее пределы для допаводковых эвакуационных мер, тем меньше, чем меньше площадь водосбора; в этом плане наиболее

опасными являются водосборы, где при большей площади это время минимально – однопиковые водосборы южного макросклона. Соотношение этого же времени с максимальными расходами для выделенных групп не показывает четких зависимостей. Отношение максимума расхода к общему стоку за паводок находится в обратной связи с временем между максимумами осадков и расходов. В рассматриваемом регионе водосбор Псекупса отличается от остальных, однако и для него показанные зависимости справедливы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для водосборов региона характерны дубовые леса с высокой водорегулирующей способностью. К востоку они сменяются буково-грабовыми лесами с еще более высокой водорегулирующей способностью. Количественные выражения этой способности нуждаются в дополнительном исследовании.

Таблица 1. Основные характеристики рассчитанного паводочного стока выделенных водосборов
Table 1. Main characteristics of the calculated flood runoff of selected catchments

Название реки River name	Максимальный расход, м ³ /с Maximum flow rate, m ³ /s	Сток за паводок, млн м ³ Flood runoff, million m ³	Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	Максимальные расход/время Maximum flow rate/time	Максимальные расход/сток за паводок, м ³ /с на 1 млн м ³ Maximum flow rate/runoff per flood, m ³ /s per 1 million m ³	Время между максимумами осадков и стока, ч The time between the maxima in precipitation and runoff, hour
Южный макросклон Северо-Западного Кавказа The southern macroslope of the North-West Caucasus						
Гостагайка / Gostagayka	902	32,36	230	41,0	27,9	22
Анапка / Анапка	1016	56,73	404	29,9	17,9	34
Сукко / Sukko	516	11,91	85	64,5	43,3	8
Дюрсо / Dyurso	378	7,57	54	63,0	49,9	6
Озерейка / Ozereyka	434	6,92	49	86,8	62,7	5
Цемес / Temes	567	11,95	85	81,0	47,4	7
Дооб / Doob	207	3,22	23	103,5	64,3	2
Яшамба / Yashamba	407	6,01	43	203,5	67,7	2
Мезыбь / Mezyb'	1105	27,34	195	157,9	40,4	7
Джанхот / Dzhankhot	420	7,01	50	140,0	59,9	3
Пшада / Pshada	1228	50,68	361	76,8	24,2	16
Вулан / Vulcan	1117	42,09	300	111,7	26,5	10
Джубга / Dzhubga	480	13,31	95	43,6	36,1	11
Шапсухо / Shapsukho	793	40,81	291	28,3	19,4	28
Нечепсухо / Nechepsukho	976	31,03	221	88,7	31,5	11
Ту / Tu	405	8,07	58	101,3	50,2	4
Небуг / Nebug	540	10,16	72	108,0	53,1	5
Агой / Agoy	616	12,53	89	123,2	49,2	5
Северный макросклон Северо-Западного Кавказа The northern macroslope of the North-West Caucasus						
Псебепс / Psebepe	614	20,45	146	43,8	30,0	14
Кудако / Kudako	463	12,00	85	51,4	38,6	9
Адагум / Adagum	1275	44,32	316	106,3	28,8	12
Псыж / Psyzh	588	12,17	87	65,3	48,3	9
Шибик / Shibik	324	8,78	63	29,5	36,9	11
Абин / Abin	1025	60,55	431	48,8	16,9	21
Ахтырь / Ahtyr'	584	15,95	114	44,9	36,6	13
Хабль / Habl'	788	21,24	151	71,6	37,1	11
Иль / Il'	469	18,83	134	31,3	24,9	15
Убинка / Ubinka	624	33,83	241	27,1	18,4	23
Афипс / Afips	658	49,48	352	31,3	13,3	21
Шебш / Shebsh	1240	80,49	573	45,9	15,4	27
Супс / Sups	490	12,38	88	40,8	39,6	12
Псекупс / Psekups	1416	155,58	1108	21,1	9,1	67

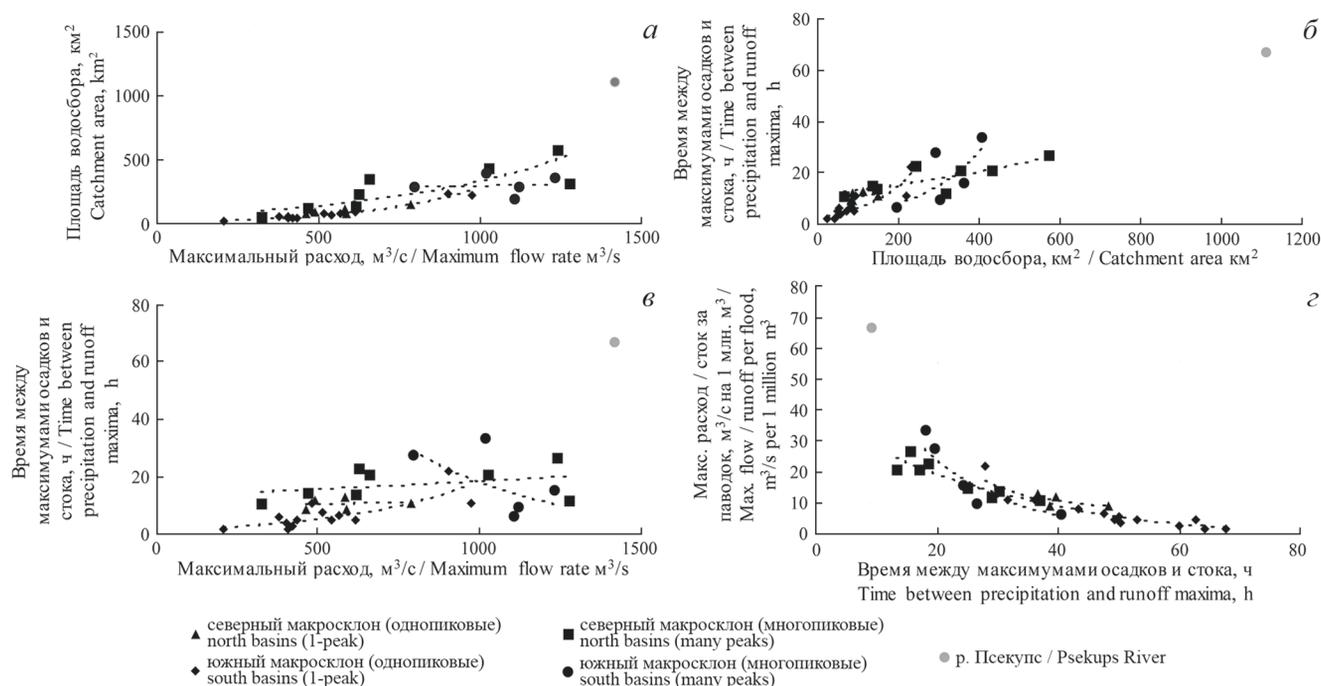


Рис. 7. Зависимости для выделенных групп водосборов между: площадями водосборов и максимальными расходами (а), временем между максимумами осадков и паводков и площадями водосборов (б), временем между максимумами осадков и паводков и максимальными расходами (в) и отношением максимального расхода к общему паводковому стоку и площадью водосбора (г).
Fig. 7. Dependencies for selected catchment groups between: catchment areas and maximum flow (a), time between precipitation and flood maxima and catchment areas (б), time between precipitation and flood maxima and maximum flow (в), and the ratio of maximum flow to total flood flow and catchment area (г).

довании для последующего учета в моделировании формирования паводков.

2. Почвенный покров региона характеризуется переходом от черноземов в северных предгорьях к дерново-карбонатным почвам на водораздельных хребтах. Распространение промывных почв в верховьях рек обуславливает стабильный сток при выпадении несильных осадков и преобразование осадков во внутриводосборный сток. В то же время слабая мощность почв способствует их быстрому напитыванию выпадающей влагой и формированию поверхностного стока. Вследствие этого обезлесенные участки имеют гораздо меньшую водорегулирующую способность и паводкообразующую опасность.

3. Наиболее опасные в паводковом отношении водосборы отличаются дружностью стока, опреде-

ляющей большие максимумы расходов, и коротким временем между пиками осадков и расходов. К таким водосборам можно отнести Озерейку, Яшамбу, Джанхот, Ту, Небуг и Агой на южном макросклоне Северо-Западного Кавказа и Кудако, Псыж, Хабль на северном.

4. Полученные характеристики относятся к замыкающим створам водосборов, паводковая опасность может сильно меняться в пространстве. Для дальнейшего изучения паводков необходимо использовать гидрологическое моделирование с распределенными параметрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-60028, а также государственного задания ФИЦ СЦ РАН по теме НИР № 0261-2019-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. 2003. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М., ДЭКС-ПРЕСС: 352 с.
 2. Георгиевский В.Ю., Ткаченко Ю.Ю. 2012. Катастрофический паводок в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г. и его причины. Федеральная служба по гидрометеорологии и монито-

рингу окружающей среды (Росгидромет). URL: <http://www.meteor.ru/press/news/1067/> (дата обращения: 21.10.2020).
 3. Болгов М.В., Коробкина Е.А. 2013. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 3: 87–102.
 4. Котляков В.М., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Лихачёва Э.А., Маккаевев А.Н., Медведев А.А., Руда-

REFERENCES

- ков В.А. 2012. Наводнение 6–7 июля 2012 в городе Крымске. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 6: 80–88. doi: 10.15356/0373-2444-2012-6-80-88
5. Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Беликов В.В., Кочетков В.В., Норин С.В. 2014. Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6–7 июля 2012 г. *Гидротехническое строительство*. 3: 29–35.
 6. Матишов Г.Г., Клещенко А.В. 2012. *Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогноз. Крымск, июль 2012*. Ростов-н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 128 с.
 7. Магрицкий Д.В., Самохин М.А., Юмина Н.М. 2013. Наводнения в Краснодарском крае и Республике Адыгея. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 4: 44–63.
 8. Вишневецкая И.А., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Шапоренко С.И., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Голубчиков С.Н. 2016. Географо-гидрологическая оценка наводнений в российском Причерноморье. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 1: 131–146. doi: 10.15356/0373-2444-2016-1-131-146
 9. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. 2008. *Современные проблемы гидрологии*. М., Академия: 320 с.
 10. Gerrits A.M.J. 2010. *The role of interception in the hydrological cycle*. Delft, VSSD: i–xx + 126 p.
 11. Carlyle-Moses D.E., Gash J.H.C. 2011. Rainfall Interception Loss by Forest Canopies. In: *Forest Hydrology and Biogeochemistry. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol. 216*. Dordrecht, Springer: 407–423. doi: 10.1007/978-94-007-1363-5_20
 12. Климентов П.П. 1971. *Общая гидрогеология*. М., Высшая школа: 303 с.
 13. Марчик Т.П., Ефремов А.Л. 2006. *Почвоведение с основами растениеводства: учебное пособие*. Гродно, изд-во ГрГУ: 322 с.
 14. Rinaldo A., Vogel G.K., Rigon R., Rodriguez-Iturbe I. 1995. Can one gauge the shape of a basin? *Water Resources Research*. 31(4): 1119–1127. doi: 10.1029/94WR03290
 15. Jarvis R.S. 1976. Classification of nested tributary basins in analysis of drainage basin shape. *Water Resources Research*. 12(6): 1151–1164. doi: 10.1029/WR012i006p01151
 16. Boorman D.B., Reed D.W. 1981. *Derivation of a catchment average unit hydrograph. Report No. 71*. Wallingford, Institute of Hydrology: 50 p.
 17. Гроссгейм А.А. 1948. *Растительный покров Кавказа*. М., изд-во АН СССР: 268 с.
 18. Битюков Н.А. 1996. Гидрологическая роль горных лесов Северо-Западного Кавказа. *Лесоведение*. 4: 39–50.
 19. Вальков В.Ф., Штомпель Ю.А., Трубилин И.Т., Котляров Н.С., Соляник Г.М. 1995. *Почвы Краснодарского края, их использование и охрана*. Ростов н/Д, изд-во СКНЦ ВШ: 192 с.
 20. Белоногова Н.А., Виноградов А.Ю., Виноградова Т.А., Догановский Д.А., Кондратьев А.Н., Марков М.Л., Минаев А.Н., Мотовилов Б.П., Никитина И.С., Салминен Э.О. 2016. О времени добегаания и гидроморфометрических характеристиках водотоков при расчетах ливневых паводков на малых неизученных реках лесной зоны. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 217: 91–107. doi: 10.21266/2079-4304.2016.217.91-107
 1. Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. 2003. *Katastroficheskie navodneniya nachala XXI veka: uroki i vyvody. [Disastrous floods of the beginning of the XXI century: lessons and conclusions]*. Moscow, DEKS-PRESS: 352 p. (In Russian).
 2. Georgievsky V.Yu., Tkachenko Yu.Yu. 2012. [Catastrophic flood in the Adagum River basin on July 6–7, 2012 and its causes]. *Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy*. Available at: <http://www.meteorf.ru/press/news/1067/> (accessed 21 October 2020). (In Russian).
 3. Bolgov M.V., Korobkina E.A. 2013. [Reconstruction of rain flood at the Adagum River on the basis of mathematical models for discharge formation]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 3: 87–102. (In Russian).
 4. Kotlyakov V.M., Desinov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Likhacheva E.A., Makkaveev A.N., Medvedev A.A., Rudakov V.A. 2012. [Flash Flood in Krymsk, July 6–7, 2012]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 6: 80–88. (In Russian). doi: 10.15356/0373-2444-2012-6-80-88
 5. Alekseevskii N.I., Krylenko I.N., Belikov V.V., Kochetkov V.V., Norin S.V. 2014. Numerical hydrodynamic modeling of inundation in Krymsk on 6–7 July 2012. *Power Technology and Engineering*. 48(3): 179–186. doi: 10.1007/s10749-014-0505-y
 6. Matishov G.G., Kleshchenkov A.V. 2012. *Kubanskiy pavodkovyy krizis. Klimat, geomorfologiya, prognoz. Krymsk, iyul' 2012. [Kuban flood crisis. Climate, geomorphology, forecast. Krymsk, July 2012]*. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 128 p. (In Russian).
 7. Magritsky D.V., Samokhin M.A., Yumina N.M. 2013. [Inundations in the Krasnodar Region and the Republic of Adygeya]. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 4: 44–63. (In Russian).
 8. Vishnevskaya I.A., Desinov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Shaporenko S.I., Kireeva M.B., Frolova N.L., Retz E.P., Golubchikov S.N. 2016. Geographical and hydrological assessment of floods in the Russian Black Sea Region. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 1: 131–146. (In Russian). <https://doi.org/> doi: 10.15356/0373-2444-2016-1-131-146
 9. Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. 2008. *Sovremennyye problemy gidrologii. [Modern problems of hydrology]*. Moscow, Academiya: 320 p. (In Russian).
 10. Gerrits A.M.J. 2010. *The role of interception in the hydrological cycle*. Delft, VSSD: i–xx + 126 p.
 11. Carlyle-Moses D.E., Gash J.H.C. 2011. Rainfall Interception Loss by Forest Canopies. In: *Forest Hydrology and Biogeochemistry. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol. 216*. Dordrecht, Springer: 407–423. doi: 10.1007/978-94-007-1363-5_20
 12. Klimentov P.P. 1971. *Obshchaya gidrogeologiya. [General hydrogeology]*. Moscow, Vysshaya shkola: 303 p. (In Russian).
 13. Marchik T.P., Efremov A.L. 2006. *Pochvovedenie s osnovami rastenievodstva: uchebnoe posobie. [Soil science with the basics of crop production: textbook]*. Grodno, Grodno State University: 322 p. (In Russian).
 14. Rinaldo A., Vogel G.K., Rigon R., Rodriguez-Iturbe I. 1995. Can one gauge the shape of a basin? *Water Resources Research*. 31(4): 1119–1127. doi: 10.1029/94WR03290

15. Jarvis R.S. 1976. Classification of nested tributary basins in analysis of drainage basin shape. *Water Resources Research*. 12(6): 1151–1164. doi: 10.1029/WR012i006p01151
16. Boorman D.B., Reed D.W. 1981. *Derivation of a catchment average unit hydrograph. Report No. 71*. Wallingford, Institute of Hydrology: 50 p.
17. Grossgeim A.A. 1948. *Rastitel'nyy pokrov Kavkaza*. [Vegetation cover of the Caucasus]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publishers: 268 p. (In Russian).
18. Bitjukov N.A. 1996. [Hydrological role of mountain forests in the North-West Caucasus]. *Lesovedenie*. 4: 39–50. (In Russian).
19. Valkov V.F., Shtompel A.Yu., Trubilin I.T., Kotlyarov N.S., Solyanik G.M. 1995. *Pochvy Krasnodarskogo kraja, ikh ispol'zovanie i okhrana*. [Soils of the Krasnodar Region, their use and protection]. Rostov-on-Don, North Caucasus Research Center of Higher Education: 192 p. (In Russian).
20. Belonogova N.A., Vinogradov A.Yu., Vinogradova T.A., Doganovsky D.A., Kondrat'ev A.N., Markov M.L., Minaev A.N., Motovilov B.P., Nikitina I.S., Salminen E.O. 2016. [About time lag and some morphometric characteristics of streams of the forest zone]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*. 217: 91–107. (In Russian). doi: 10.21266/2079-4304.2016.217.91-107

Поступила 28.12.2020