

УДК 630(07):630*58:630*116

БИТЮКОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

РЕЧНОЙ СТОК НА ТЕРРИТОРИИ СОЧИНСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

NIKOLAI BITUKOV

RIVER FLOW IN BLACK SEA AREA AROUND SOCHI

Аннотация. В статье излагаются результаты исследований речных бассейнов различного ранга территории Сочинского Причерноморья, их гидрологические характеристики, режим и территориальное распределение элементов речного стока. Анализ географических факторов формирования стока позволил получить уточнённую оценку пространственного распределения его характеристик с учётом размеров и высоты водосборов, предложены эмпирические зависимости для расчёта годового стока в условиях недостаточной гидрологической изученности.

Ключевые слова: Сочинское Причерноморье, речная сеть, русловой сток, расчёты максимального стока.

Abstract. The article gives an account of the results of investigations of river basins of different range in the Black Sea area around Sochi, their hydrologic peculiarities, water schedule, and geographical distribution of river flow. Due to the analysis of geographical factors of flow formation, the author obtained an updated assessment of spatial distribution of its traits, with due account for the size and height of water catchment areas and suggested empirical dependencies for the calculation of annual flow under insufficient hydrological state of exploration.

Key words: the Black Sea area around Sochi, fluvial network, channel flow, calculations of maximum flow/runoff.

Исследуемая территория является частью Северо-Западного Кавказа, именуемая также Черноморским побережьем Кавказа, и включает территорию Сочинского национального парка, а также сопредельную городскую территорию муниципального образования Сочи и часть Кавказского госзаповедника. Поскольку речная сеть здесь формируется как единое целое и является результатом взаимодействия сложных физико-географических процессов (климатических, гидрологических, геоморфологических и других), целесообразно общую территорию обозначить как **Сочинское Причерноморье**. Особенностью этой территории в гидрологическом отношении является то, что район представляет собой ряд замкнутых речных бассейнов с резко очерченным контуром, внутри которого происходит весь процесс круговорота влаги. Осадки, выпадающие в бассейнах рек в виде дождя и снега, частично уходят на испарение и транспирацию, но большей частью возвращаются поверхностным и подземным стоком в море.

В горных условиях **речная сеть** является результатом взаимодействия сложных физико-географических процессов: климатических, гидрологических, геоморфологических и других, как своеобразный интегральный показатель этого процесса (Алексеевский и др., 2004, 2007; Анисимов, 2006; Анисимов, Битюков, 2008; Битюков, 2004, 1990, 2013, 2012; Важнов, 1966; Кузин, 1960; Ржани-

цын, 1960, 1985; Хортон, 1948; Чеботарёв, 1960). Образовавшаяся речная сеть, характеристики основной реки и речного бассейна взаимосвязаны (Орлов, 1989). По соотношению ширины и длины бассейна можно составить представление о типовой (среднем) водосборе в рассматриваемом регионе. Важной характеристикой развитости речной системы в регионе является густота речной сети (в км/км²), которая характеризует среднее расстояние между смежными водотоками и среднюю длину склонов, необходимую при расчётах склонового стока.

Речная система состоит из главной реки и питающих её различных притоков, каждый из которых течёт по долине соответствующего ему размера. Наиболее удачной является нисходящая схема, при которой за притоки 1-го порядка (элементарные водотоки) принимаются самые верхние, неразветвлённые звенья речной сети; слияние притоков 1-го порядка даёт начало притокам 2-го порядка и т.д. При сохранении такой структуры используется принцип строения речной сети, при котором между двумя притоками, сливающимися вместе, образуется третья река, представляющая физически совершенно новый русловой поток с новыми гидравлическими свойствами. Можно считать единым мнением, что неразветвлённому потоку или долине присваивается 1-й порядок.

Речная сеть – это не только система постоянно действующих водотоков, но она включает и те временные (нерусловые) потоки, которые завершают процессы склонового стока и переносят размывтый склоновый материал в постоянно действующие водотоки. Поток (долина) 1-го порядка является физической границей, разделяющей ручейковую склоновую сеть и речную сеть. Только так устанавливается единство процесса формирования речного стока и рельефа суши. В этом проявляется и единство подхода гидролога и геоморфолога к изучению речной сети и речных долин (Ржаницын, 1960).

Геоморфология района. Для формирования речной сети Сочинского Причерноморья очень важное значение имеет рельеф района. На основе генетических и морфологических различий на территории Сочинского Причерноморья выделяют четыре высотные зоны, характеризующиеся своими специфическими типами и формами рельефа. **Первая** – зона высокогорного альпийского эрозионно-

тектонического рельефа – расположена на высоте более 1800 м над уровнем моря; **вторая** – зона среднегорного эрозионно-тектонического и эрозионно-денудационного рельефа на высоте 600 – 1800 м; **третья** – зона низкогорного эрозионно-денудационного рельефа на высоте 200 – 600 м; **четвёртая** – зона полого-холмистого эрозионно-тектонического и абразионно-тектонического рельефа – до 200 м.

Зона высокогорного альпийского рельефа занимает юго-восточную часть территории (верховья рек Шахе, Мзымты, Псоу) в пределах Главного Кавказского хребта и его отрогов. Высокогорная зона характеризуется сложным эрозионным расчленением с элементами гляциального рельефа. Глубина вертикального расчленения рельефа составляет 800 – 1000 м, а густота горизонтального расчленения – 0,8 – 1,2 км/км². Крутизна склонов колеблется в широких пределах – от 20 до 45 градусов и более.

Зона среднегорного рельефа имеет наиболее широкое распространение и охватывает около 70 процентов площади рассматриваемой территории. К западу от горы Фишт (2852 м) она занимает верхнюю приводораздельную часть склона Главного Кавказского хребта, а к востоку – представлена рядом продольных и поперечных хребтов с абсолютными высотами от 500 до 1100 м. К числу наиболее крупных продольных хребтов широтного направления относятся: Алек, Пикет, Мамайский, Бытха, Ахун, Ахштырь. Эта зона имеет достаточно глубокую расчленённость с перепадами относительных высот от 200 до 800 м. Густота эрозионного расчленения составляет 0,6 – 0,8 км/км², сокращаясь до 0,2 – 0,4 км/км² в пределах карстовых массивов.

Зона низкогорного рельефа прослеживается в виде узкой полосы с небольшими расширениями в долинах рек вдоль всего побережья. На севере от среднегорной зоны она отделяется денудационным уступом. В низкогорной зоне выделяют тип эрозионно-денудационного рельефа. Вертикальное расчленение рельефа здесь не превышает 300 м, а густота эрозионного расчленения колеблется от 0,2 до 0,6 км/км², достигая на отдельных участках 0,8 км/км².

Зона полого-холмистого рельефа прослеживается в виде узкой полосы, расширяющейся вдоль морского побережья, переходя в районе Адлера в приморскую равнину. На всхолмленной поверхно-

сти выделяются отдельные хребты (хр. Ахштырь) и куполовидные поднятия (г. Ахун, г. Бытха). Вертикальное расчленение рельефа здесь составляет 50 – 100 м. Густота эрозионного расчленения – 0,2 – 0,4 км/км². Преобладают поверхности с уклонами от 5 до 10 градусов.

Гидрографическая сеть Сочинского Причерноморья формируется в соответствии с представленной выше геоморфологией района. Непосредственно в море впадают 36 рек, а остальные являются притоками первого, второго и следующих порядков. Самая крупная река района – Мзымта (длина L – 89 км и площадь водосбора F – 885 км²). Меньшие размеры имеют реки Шахе (L = 60 км, F = 562 км²), Сочи (L = 45 км, F = 296 км²), Аше (L = 40 км, F = 279 км²). При этом наиболее крупные и водоносные реки располагаются в юго-восточной части побережья.

Как следует из анализа гидрографической сети изучаемого района, всю гидрографическую сеть его можно разделить на три уровня. **Первый уровень** – бассейны рек, имеющих истоки с отрогов Главного (Водораздельного) хребта в пределах высокогорного и среднегорного рельефа). Осевое положение, наибольшие высоты и наиболее древние породы соответствуют Главному Кавказскому хребту, который прорезан долинами рек. Главный хребет в пределах Сочинского Причерноморья имеет высоты от 1425 м на горе Лысой до 3257 м на горе Псеашхо. К этому уровню в пределах Сочинского Причерноморья следует отнести 8 рек: Псоу, Мзымта, Сочи, Шахе, Псезуапсе, Аше, Макопсе и Шепси. Площади их водосборов колеблются от 896 км² (р. Мзымта) до 38,6 км² (р. Макопсе).

Второй уровень – реки, имеющие истоки в соответствии с морфологией региона с хребтов общекавказского простирания, расположенных ближе к берегу моря в пределах низкогорного рельефа. Самый протяжённый из этих хребтов – хребет Алек – Ахцу – гора Высокая (1122 м). Более короткие и более низкие хребты расположены ближе к берегу моря: Пикет, Ахун, Бытха и другие. Хребтами различных направлений разделены бассейны рек и их притоков. Всё это многообразие хребтов, отрогов, долин, ущелий образует сложную картину рельефа. Этим рек наибольшее количество – 16, они имеют

площади водосбора от 6,3 км² (р. Матросская щель) до 103 км² (р. Дагомыс).

Третий уровень – реки, имеющие истоки в зоне полого-холмистого рельефа региона, с площадям водосборов от 2,7 км² (р. Вишнёвка) до 24,8 км² (р. Херота). Этим рек всего 12 (табл.1).

Общая площадь речных бассейнов в регионе составляет – 3587,3 км², из них бассейны 1-го уровня составляют 80,6% территории, 2-го уровня – 16,2% и 3-го уровня – 3,2% территории.

Изучение генезиса стока на территории Сочинского Причерноморья позволяет разделить его формирование на две фазы – образование **склонового стока**, возникающего при превышении выпадающего дождя над процессами впитывания его в почву, и непосредственно **русловой сток** на реках различного ранга. При формировании **руслового стока** к числу основных гидрографических характеристик можно отнести: **длину потоков, площадь водосбора, число потоков различных порядков в речной сети данного порядка**. Особое значение при этом приобретают гидравлические характеристики открытого руслового потока. Горные реки имеют свои характерные особенности, состоящие в том, что открытое русло занято поверхностным водным потоком, а часть этого потока движется в подрусловых галечно-валунных отложениях. В связи с увеличением объёма этих отложений от истока к устью на основных реках региона объём измеренного стока уменьшается. Так, для р. Мзымты на участке от Красной Поляны до пос. Кепш уменьшение стока оценивается в среднем около 200 мм га год.

Результаты исследований речного стока на 6 реках Сочинского Причерноморья показали, что при изучении русловых процессов определение энергетических потерь в русловых потоках является одним из важнейших задач как с точки зрения теоретической, так и практической. Доказано, что в практике гидротехнических расчётов открытых русел необходимо пользоваться формулой Шези для определения скорости равномерного движения в руслах, при этом важным является вопрос определения коэффициента шероховатости.

Исходя из анализа обработанных натурных данных по коэффициенту шероховатости (КШ), нами сделан вывод: чем большим запасом кинетической

Таблица 1

**Список рек на территории Сочинского Причерноморья,
впадающих непосредственно в Черное море**

1-й уровень			2-й уровень			3-й уровень		
Истоки рек – Главный Кавказский хребет			Средние реки – истоки на отрогах параллельных хребтов			Малые реки низкогорья		
№ п/п	Название	Площадь, км ²	№ п/п	Название	Площадь, км ²	№ п/п	Название	Площадь, км ²
1	Псоу	428.0	9	Кудепста	86.9	25	Херота	24.8
2	Мзымта	896.4	10	Хоста	96.6	26	Агура	16.9
3	Сочи	295.3	11	Мацеста	67.4	27	Бзугу	14.6
4	Шахе	553.6	12	Дагомыс	103.3	28	Псахе	18.7
5	Псезуапсе	289.5	13	Лоо	34.1	29	Уч-Дере	6.8
6	Аше	278.8	14	Хобза	24.5	30	Детляшко	6.2
7	Макопсе	38.6	15	Буу	22.7	31	Беранда	6.2
8	Шепси	56.2	16	Хаджипсе	24.8	32	Осохой	3.8
			17	Магросская щель	6.3	33	Годлик	4.3
			18	Чемитоквадже	34.0	34	Магри	4.7
			19	Чухукт	15.1	35	Вишнёвка	2.7
			20	Цусхвадже	24.8	36	Водопадная	3.9
			21	Свирка (Свирский)	6.5			
			22	Куапсе	14.9			
			23	Неожиданная	7.9			
			24	Шуюк	11.6			
	Всего – 8	2892,6		Всего – 16	581,1		Всего – 12	113,6

энергии обладает поток, тем большее её количество этот поток (в естественном состоянии) должен затратить на преодоление путевых сопротивлений, т. е. тем больше КШ. Это объясняется взаимодействием потока с руслом: увеличение скоростей резко повышает транспортирующую способность потока. По тем же причинам коэффициенты шероховатости будут больше для перекатов, чем для плёсовых участков рек, должно также наблюдаться уменьшение КШ от истока к устью реки. Интересно отметить, что для зарегулированной реки (устроены бетонные береговые стенки – гидроствор р. Сочи – г. Сочи) коэффициенты шероховатости оказались наименьшими в сравнении с другими – незарегули-

рованными – реками. По результатам выполненного исследования сделаны следующие выводы:

– При определении скоростного коэффициента для формулы Шези следует пользоваться формулами Павловского или Агроскина, поскольку указанные формулы дают наиболее надёжные результаты по сравнению с другими.

– Выбор коэффициента шероховатости по таблице Срибного на основании характеристик водного потока обладает тем недостатком, что в оценке n вносится элемент субъективности, что может привести к большим ошибкам в расчётах. Помимо этого, при таком выборе не учитывается динамика коэффициента шероховатости.

– Коэффициент шероховатости можно с достаточной степенью точности определять по построенным на основании гидрометрических данных зависимостям $n=f(h_{cp})$ или $n=f(H)$ для рек с небольшой деформацией русла.

– Как показала обработка опытных данных, коэффициент шероховатости для горных рек может изменяться в значительных пределах, увеличиваясь до $n=0,100 - 0,127$ при малых расходах и до $n=0,050 - 0,070$ – при паводочных расходах, и уменьшаясь до $n=0,022 - 0,042$ при средних расходах. По своей динамичности коэффициент шероховатости почти одинаков со скоростным коэффициентом.

– В последнее время в связи с выполнением расчётов расходов воды максимальных паводков по меткам высоких вод (других методов оценки катастрофических паводков не существует) наиболее достоверным способом оценки шероховатости естественного русла может быть установление его абсолютной шероховатости путём непосредственного измерения характерных неровностей дна на основе вышеприведённого исследования.

Реки Сочинского Причерноморья имеют ярко выраженный паводочный водный режим, паводки в подавляющем большинстве имеют дождевое и ливневое происхождение. Средний модуль стока рек составляет 60 – 70 л/сек с 1 км² и значительно увеличивается от устьев рек к истокам. В маловодные годы некоторые реки в устьевых частях полностью теряют поверхностный сток. Число паводков составляет в среднем 25 – 30 в год. Паводки (особенно летние) характеризуются кратковременностью (в среднем до 5 – 6 суток) и большой интенсивностью подъёма уровня воды (от 1 – 2 до 4 – 5 м). Руслоформирующие паводки возникают при выпадении интенсивных ливней, превышающих 80 мм. Исторические паводки селевого характера на крупнейших реках района прошли в конце июня 1956 года, в августе 1960 года, в июле 1989 года, в июле 1991 года и др.

Горные реки здесь имеют повышенную скорость течения, небольшую глубину, гравийно-валунное дно. В результате воды их хорошо перемешиваются и аэрируются. Реки насыщены кислородом и его содержание практически не опускается ниже допустимых пределов. Летом на устьевых участках рек в результате увеличения антропогенной нагрузки

содержание кислорода несколько снижается. По щёлочно-кислотным условиям вода рек отнесена к нейтральной и слабощелочной, pH изменяется в пределах нормы. По суммарному содержанию ионов в воде реки относятся к маломинерализованным (Мзымта, Сочи, Шахе – сумма ионов до 200 мг/л) и среднеминерализованным (Хоста, Псеуапсе, Аше). В воде рек Черноморского побережья преобладают гидрокарбонатные ионы и Ca²⁺.

Реки района осуществляют работу по переносу крупных гравийно-галечных и валунных фракций, служащих источником пополнения прибрежной полосы (галечного пляжа). Установлено, что на участке Туапсе – Адлер реками ежегодно выносятся в среднем до 120 – 125 тыс. м³ обломочного материала, в том числе р. Псоу – 19 тыс. м³, р. Мзымтой – 39 тыс. м³, р. Шахе – 25 тыс. м³, р. Сочи – 13,6 тыс. м³, р. Аше – 12,3 тыс. м³, р. Псеуапсе – 13 тыс. м³, р. Хоста – 3,2 тыс. м³. Твёрдый сток рек имеет тенденцию к сокращению (за 30 лет он сократился на 230 тыс. м³) (Кузьминская, 2006).

Влияние площади водосбора на русловой сток. Как установлено, на изучаемых реках во внутригодовом распределении преобладает сток холодного периода: на него приходится 85,7...81,5% годового объёма в маловодном году, 85,5...76,4 – в среднем по водности году и 84,9...78,7% – в многоводном году. Средние модули максимального стока, по многолетним данным, достигают 2200 л/с · км². Следует отметить чёткую зависимость норм модулей максимального стока от величин площадей водосбора: максимальные расходы увеличиваются приблизительно пропорционально корню четвёртой степени из площади водосбора:

$$Q_{\max} = k F^{1/4} (1).$$

Максимальные расходы отмечают чаще всего в конце лета. По длине реки модули стока возрастают от устьев к истокам, что связано с увеличением средней высоты бассейна. В приустьевой части все реки побережья имеют в руслах большие галечные накопления, внутри которых проходит значительный подрусовой сток. В засушливые годы некоторые реки, даже довольно крупные (р. Псеуапсе), полностью теряют сток в галечниках.

Поскольку из-за влияния площади водосбора генезис стока на опытных бассейнах различен (различна доля подземного питания ручьёв), име-

ет смысл провести анализ суммарного сезонного стока каждого водосбора по периодам с помощью сравнительных коэффициентов. Усреднённая кривая изменения коэффициентов годового суммарного стока с увеличением площади водосбора аппроксимируется в пределах 0 – 20 га экспонентой: $\alpha = 0,67 * e^{0,225 F} - 0,7$ (2),

где: α - коэффициент годового стока в %; F – площадь водосбора в га.

С дальнейшим увеличением площади бассейна для водосборов более 20 га рост α замедляется, и экспонента (2) заменяется S-образной кривой (для $F=0\dots30$ га):

$$\alpha = F * 10^{-4} * e^{-0,183 F} \quad (3).$$

Разработаны зависимости, показывающие генетическую связь между величиной стока и площадью бассейна. Доказано, что с увеличением площади возрастает минимальный сток и уменьшается максимальный и средний за сезоны. При этом регулирующая ёмкость водосбора обусловлена не только размерами водосбора, но и его уклоном.

Влияние снежного покрова на формирование речного стока. По многолетним данным изучено влияние снежного покрова на формирование речного стока.

Особенности формирования снежного покрова в горных лесах Сочинского Причерноморья на примере зоны буковых лесов. Основные экспериментальные данные получены на лесогидрологическом стационаре (ЛГС) «Аибга», располагающемся на склоне юго-западной экспозиции на высоте 480 – 1150 м над уровнем моря в бассейне реки Мзымты. Подробная характеристика района исследований приведена в монографии «Экологические функции горных лесов Северного Кавказа (Битюков, 2008). Наблюдения за снежным покровом состояли в ежедневном измерении высоты снега на открытой метеоплощадке и периодических снегомерных маршрутных съёмках на площадях рубок и под пологом леса. Периодичность снегосъёмок – через 5 дней, методика – общепринятая в Росгидромете. Общая длина маршрута зависела от варьирования высоты и плотности снега, т.е. от равномерности залегания снежного покрова, при минимальной протяжённости маршрута не менее 500 м.

Установлено, что для южного макросклона Северо-Западного Кавказа на высотах более 1200 м

над у. м. более половины зимних осадков (X – III) аккумулируется в снежном покрове и расходуется в весенне-летний период – с апреля до середины июня. Максимальные запасы воды в снеге и количество осадков за зимний период практически совпадают по величине на высотах около 1800 м. По данным измерений Росгидромета (за 1986 – 1989 гг.), получена зависимость коэффициента снегонакопления (представляющего *долю осадков в виде снега* от общей суммы зимних осадков) от высоты над уровнем моря в бассейне р. Мзымты.

В Сочинском Причерноморье для основных рек (Мзымта, Шахе и др.) высокогорья составляют более половины площади их бассейнов. Так, для р. Шахе высотная зона 1000 – 3000 м над у. м. равна 319 км² (58% площади водосбора), для р. Сочи – 130 км² (44%), для р. Мзымты – 355 км² (40%). На высокогорных частях бассейнов рек 60 – 80% и более от суммы осадков, выпадающих в холодный период года, зарегулированы снежным покровом. Следствием расходования аккумулированных в зимнее время осадков является тот факт, что на реках, имеющих высокогорья, объём стока в апреле – мае достигает 40 – 44% от всего годового стока, а вариация годового стока в многолетнем разрезе наименьшая – 0,16 – 0,21.

Анализ **баз данных** по осадкам показал, что практически все метеостанции и посты, имеющие длительные ряды наблюдений, располагаются в средней и нижней частях бассейнов рек региона. Поэтому измеренные данные по осадкам не могут характеризовать увлажнённость всего бассейна реки и требуют корректировки с учётом высотной поясности водосбора. Установлено, что цикличность осадков и речного стока для отдельных частей региона носит общий характер.

Анализ хронологических графиков модульных коэффициентов стока и осадков позволил установить наличие асинхронности хронологических изменений K_t по отношению к контрольным водосборам, что объясняется изменением состояния лесной растительности на бассейне. Выявлена достоверная связь модульных коэффициентов стока и осадков на контрольных бассейнах. Например, для бассейна р. Мзымты определена зависимость, которая может быть использована для оценки влияния рубок на сток: $K_{\text{н}} = 1,09 * K_{\text{х}} - 0,084$, $r = 0,861$ (4).

Особое значение при этом приобретают гидравлические характеристики открытого руслового потока. Горные реки имеют свои характерные особенности, состоящие в том, что открытое русло занято поверхностным водным потоком, а часть этого потока движется в подрусовых галечно-валунных отложениях. В связи с увеличением объёма этих отложений от истока к устью, на основных реках региона объём измеренного стока уменьшается. Так, для р. Мзымты на участке от Красной Поляны до пос. Кепш уменьшение стока оценивается в среднем около 200 мм га год.

Выводы:

Анализ баз данных по стоку рек Сочинского Причерноморья показал, что имеется определённая корреляция между модульными коэффициентами стока и осадков, причём эта корреляция более тесная в средневысотной зоне и резко ухудшается при хозяйственном использовании бассейна реки. Обращает на себя внимание, что основная часть гидрометрических постов с измерениями расходов воды подверглась закрытию в период 2003 – 2005 гг., поскольку работы по организации изучения руслового стока весьма трудоёмки. Изучение склонового стока вообще прекращено.

В связи с участвовавшими катастрофическими паводками увеличено число открытых автоматических равномерных постов (до 48 в Сочинском Причерноморье), хотя известно, что для горных рек, характеризующихся неустойчивым руслом, уровень воды не является достаточной характеристикой водности реки.

В целом, анализ географических факторов формирования стока позволил получить уточнённую оценку пространственного распределения его характеристик с учётом размеров и высоты водосборов, предложены эмпирические зависимости для расчёта годового стока в условиях недостаточной гидрологической изученности.

Литература

1. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Тр. Одесского гидрометинститута. Вып. 14. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 310 с.
2. Битюков Н.А. Речной сток в условиях Черноморского побережья Кавказа // Докл. Соч. отд. Геогр. общ-ва при АН СССР. Вып. 2. 1971. С. 184 – 189.

3. Битюков Н.А. Гидрологическая роль горных лесов Северо-Западного Кавказа // Лесоведение, 1996. № 4. С. 39 – 50.

4. Битюков Н.А. Водный баланс водосборов в связи с рубками в буковых лесах Северного Кавказа // Лесоведение. 1988. № 3. С. 56 – 65.

5. Битюков Н.А. Методические принципы изучения гидрологической роли горных лесов. // Проблемы лесоведения и лесной экологии: Тез. докл. АН СССР, Госкомлес СССР. М. 1990. С. 8 – 11.

6. Битюков Н.А. Экология горных лесов Причерноморья. Сочи: ФГУ НИИгорлесэкол, 2007. 397 с.

7. Битюков Н.А. Мониторинг экосистем буковых лесов Сочинского Причерноморья // Монография // Научные труды Сочинского национального парка. Вып. 5. ISBN 978589-204-228-4 391.

8. Битюков Н.А., Шагаров Л.М. Мониторинг атмосферных осадков в буковых лесах Черноморского побережья Кавказа. Статья// Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. № 1. 2013. С. 67 – 71.

9. Битюков Н.А. Ландшафтное районирование Сочинского национального парка // Статья РГО Вестник Краснодар. регион. отделения РГО. Краснодар: Платонов. Вып. 6. 2012.

10. Битюков Н.А., Пестерева Н.М., Ткаченко Ю.Ю., Шагаров Л.М. Рекреация и мониторинг экосистем особо охраняемых природных территорий Северного Кавказа: // Сочи: ГОУ ВПО СГУ. 2012. 456 с., с ил. Монография ISBN: 978-5-91789-110-1.

11. Коваль И.П., Битюков Н.А. и др. Состояние почвенного покрова и изменение водорегулирующих функций горных лесов в связи с рубками. Сб. научн. трудов. Вып. 11. М., ВНИЛМ, 1976.

12. Коваль И.П., Битюков Н.А. Экологические основы пользования лесом на горных водосборах (на примере Северного Кавказа). Краснодар, 2001. 408 с.

13. Коваль И.П., Битюков Н.А. Экологические функции горных лесов Северного Кавказа. М.: ВНИИЦлесресурс. 2000. 480 с.

14. Коваль И.П., Битюков Н.А. Шевцов Б.П. Экологические основы горного лесоводства // Монография. Сочи: ФБГУ «НИИгорлесэкол», 2012.– 565 с. ISBN: 978-5-91789-104-0с.

15. Юмина Н.М. Паводочный сток рек Северного Кавказа // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2008. № 2. С. 51 – 56.

Битюков Николай Александрович

**СКЛОНОВЫЙ СТОК И ФАКТОРЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ ЕГО В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ
СОЧИНСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ**

NIKOLAI BITUKOV

**OVERLAND FLOW AND FLOW FORMATION FACTORS IN BLACKS SEA AREA
AROUND SOCHI**

Аннотация. В статье излагаются результаты исследований возникновения дождевого стока на склонах под буковыми насаждениями Сочинского Причерноморья. Склоновый сток на малых (элементарных) водосборах равен 4 – 6% от годовых осадков, в зимний период он выше 3,0...3,8%, а летом – в 2...3 раза меньше зимнего (1,5...2,8%). Для расчёта коэффициентов паводкового склонового стока на малых бассейнах в зоне буковых лесов предлагаются эмпирические зависимости, учитывающие предварительное увлажнение бассейна и график паводкообразующего дождя.

Abstract: The article gives an account of the results of investigations of the formation of rainfall runoff downslope the beech forests in the Black Sea area around Sochi. The overland flow in small (elementary) water catchment areas was shown to equal to 4 to 6% of the yearly precipitation; in winter it was more than 3.0–3.8%, and in summer it was 2 to 3 times less (1.5 to 2.8%). To calculate flood overland flows in small basins in beech forests, empirical dependencies were suggested allowing for basin prewetting and the schedule of flood-causing rains.

Ключевые слова: Дождевой сток, Сочинское Причерноморье, буковые леса, малые бассейны, математические модели стока

Key words: rainfall runoff, the Black Sea area around Sochi, beech forests, small basins, mathematical runoff/flow models.

Исследованиями доказано, что для горных условий имеет смысл оперировать понятием «склоновый сток», для которого основным отличительным признаком является скорость добегаания до основного русла (Андреянов, 1970; Ахутин, 1931; Бефани, 1958; Бефани и др., 1967, 1966; Важнов, 1966; Евстигнеев, 1990; Коваль и др., 2001, 2012 и др.). **Склоновым стоком** следует считать то количество воды, которое проходит через замыкающий створ в течение нескольких часов после выпадения паводкообразующих осадков (по крайней мере, в течение 1 – 2 суток после дождя). По своим гидравлическим характеристикам и эрозионным свойствам склоновый сток сходен с поверхностным стоком в равнинных условиях (Битюков, 1971, 1972, 1996, 1988, 1994 1990; Битюков и др., 2012, 2013).

В отличие от склонового, в более глубоких горизонтах почво-грунтов (глубже 0,5 – 1,0 м) формируется **грунтовый сток**, характеризующийся большим временем добегаания до замыкающего створа (от нескольких суток до нескольких месяцев) и вследствие особенностей среды формирования обладающий своими особыми физико-химическими качествами.

Процессы формирования стока. На горных склонах формирование стока характеризуется большой сложностью. Факторы, влияющие на формирование стока, делятся на группы: **метеорологические** (количество осадков и форма графика

дождя), влияющие на динамику поступления воды в бассейн; **условия подстилающей поверхности**, которые определяют процессы инфильтрации и стекания воды, а также **потери стока** (Бефани и др., 1967, 1966, Юмина, 2008; и др.).

От **метеорологических факторов** зависит поступление воды на водосбор, динамика его во времени, количество поступившей воды. От факторов подстилающей поверхности зависят условия стекания воды, потери поверхностного стока, которые определяются характером почвы, водным балансом рассматриваемой территории, а также временем, необходимым для стока того или иного количества осадков, выпавших на бассейн. К числу факторов, влияющих на быстроту и продолжительность движения этих вод, относятся **величина и форма бассейна, уклоны, русловые условия водотоков**, длина и шероховатость склонов, связанная с характером растительности и микрорельефом, объём и интенсивность поступления воды на бассейн.

Известно, что **общие потери** паводкового стока на горных склонах определяются свободной ёмкостью почвенного задержания и величиной глубинной инфильтрации (поглощением воды подстилающими породами). Поэтому при изучении склонового стока в горных районах большое значение имеет определение параметров почвенного задержания и аккумуляции, а также глубинной инфильтрации. **Сочетание глубинной инфильтрации, поверхностного впитывания и почвенного задержания** определяет величину стока и его распределение на поверхностную и внутриводосборную составляющие.

Условия формирования склонового стока весьма различны. Так, общий сток со склона, нарушенного рубкой леса, равен сумме поверхностного и внутриводосборного. На волоках внутриводосборный сток отсутствует, поэтому $Y_{\text{общ.}} = Y_{\text{пов.в.}}$.

Уравнение для общего стока с нарушенного рубкой склона выглядит следующим образом (Бефани, 1958, Бефани и др., 1967, 1966; Битюков, 1971, 1988, 1994, 2007, 2012 и др.):

$$Y_{\text{н. (общ.)}} = X - H_{\text{н.з.}} - K'_{\text{е}} * T - 0,3 K''_{\text{е}} t_{\text{н}} \quad (1),$$

где: $t_{\text{н}}$ – продолжительность спада на участках между волоками, равная:

$$t_{\text{н}} = t_{\text{е}} * \frac{1}{N}; H_{\text{н.з.}} - \text{почвенное задержание между волоками.}$$

Таким образом, изменение склонового стока в результате технологических нарушений почвенного покрова происходит в сторону увеличения, и в особенности – поверхностного стока. Наиболее значительно сказываются изменения поверхности склона после рубок на увеличении высоты максимума паводка. Из модели полного стока следует:

$$q = h_{\text{осадк.}} - K'_{\text{пов.}} \quad (2),$$

$$\text{где: } h_{\text{осадк.}} = \frac{\Delta}{t_{\text{пов.}}^n}, \Delta - \text{сила дождя,}$$

$t_{\text{пов.}}$ – т. е. наибольшая единичная интенсивность за дождь; $t_{\text{пов.}}$ – время добега; n – показатель редукции осадков, для Кавказа равный $n = 0,667$.

Влияние крутизны склона на склоновый сток. Для малых (до 10 га) водосборов по опытным данным (с использованием методики А.Н. Бефани (1967), в основе которой лежит построение графиков ливней и выделение на них площадей, равных наблюдаемому стоку) установлено, что впитывание здесь очень динамично во времени и определяется степенью предшествующего увлажнения. При этом паводко-образующими могут быть ливни различной величины: летом при значительном дефиците влаги в почве ливни с суммой осадков до 50 мм иногда не дают стока; в то же время в холодный период года при полностью увлажнённой почве стокообразующими являются дожди 10...12 мм. График связи коэффициента склонового стока (Y , %) от крутизны склона (X , град.), который имеет аналитическое выражение:

$$Y = 0,6427 * X + 0,342 \text{ при } R^2 = 0,929 \quad (3).$$

Зависимость эта получена по результатам опытов по дождеванию монолита почвы 0,5 м х 0,5 м х 1,0 м при различных углах наклона.

Влияние на сток режима дождевых осадков. По результатам наблюдений на лесных водосборах площадью до 20 га получены уравнения множественной корреляции, связывающие коэффициенты склонового стока с характеристиками стокообразующих ливней и факторами предшествующего увлажнения (Битюков, 2008):

$$\alpha = 10,5 * i_{\text{ср}} + 6,7 * i_{\text{max ч}} - 0,045 T - 0,064 * DW + 5,7 \quad (4);$$

$$R = 0,61; S = 2,7\%$$

Для расчёта слоя склонового стока на таких водосборах получена зависимость:

$$Y = X - k * T - 0,032 DW - 6,86 \quad (5).$$

Здесь: Y – слой стока в мм; a – коэффициент стока за паводок в %; X – слой паводкообразующего дождя; k – интенсивность впитывания; T – продолжительность ливня в мин.; $i_{\text{ср}}$ – его средняя интенсивность, а $i_{\text{макс ч}}$ – максимальная часовая интенсивность ливня в мм/мин; ΔW – дефицит влаги в 1-метровом слое почвы перед паводком в мм; R – коэффициент множественной корреляции, S – ошибка уравнения.

В связи с тем, что в горных условиях количество осадков зависит от высоты и ориентации склонов, для расчёта средних сумм осадков по каждому элементарному водосбору мы вносили поправочные коэффициенты, учитывающие плювиометрические градиенты (увеличение осадков с высотой для холодного времени года в среднем равно 5,0% на 100 м подъёма, а для теплого сезона – 4,1 %). С учётом гипсографических кривых бассейнов полученные поправочные коэффициенты на увеличение осадков с высотой вводились при балансовых расчётах.

Гидрологическая роль почвенного покрова. Наиболее обстоятельные исследования лесных почв региона выполнены С.В. Зонном (1950), И.П. Герасимовым (1951), А.И. Никитиным и Н.В. Куклиным (1951) и др. С.В. Зонн (1950) отмечает, что лесная растительность с сопутствующими микрофлорой и животным миром являются ведущими в почвообразовании. Одной из наиболее существенных физических характеристик почв общепризнано считать их объёмный вес, или плотность. С одной стороны, как отмечают И.Б. Ревут (1962, 1972), В. С. Шумаков (1970, 1973) и др., объёмным весом почвы (для одинаковых почвенных разностей) определяется водный, воздушный и температурный режимы и, следовательно, биохимические процессы в почве и режим основных элементов питания растений. В настоящей работе на примере почв, сформировавшихся под букowymi и дубовыми лесами Черноморского побережья Кавказа, нами предпринята попытка рассмотреть объёмный вес и другие водно-физические свойства почв в роли формирования склонового стока в различных лесорастительных условиях.

Объёмный вес определялся с помощью почвенного бора БП-50 (монолитами объёмом 500 и 250 см³). Для оценки точности определения плотности почвы буром БП-50 было произведено срав-

нение данных, полученных на БП-50, с величинами плотности, полученными по монолитам объёмом 1000 см³ (параллельными отборами образцов). Полученные результаты подтвердили возможность использования монолитов объёмом 500 и 250 см³. Взятые почвенные образцы использовались для определения предельной полевой (наименьшей) влагоёмкости по общепринятой методике (Федоровский, 1965; Вадюнина, Корчагина, 1973). Кроме того, монолиты объёмом 500 см³ подвергались фильтрованию по методу Канараке (Ревут, 1972). Принцип этого метода состоит в фильтровании воды через почвенные образцы, взятые в ненарушенном состоянии, на установке, смонтированной по С.В. Астапову (Вадюнина, Корчагина, 1973). Монолит высотой 10 см заключался в металлический цилиндр, по внутреннему кольцу заливался стеарином для предохранения от пристенной фильтрации, и подвергался фильтрованию при постоянном градиенте 10 – 20 мм. Величины скорости фильтрации, полученные при стабилизации процесса просачивания воды через монолит (т. е. в конце опыта), представляют собой так называемый **условный коэффициент фильтрации (УКФ)**. В отличие от интенсивности впитывания воды почвой в естественных условиях, УКФ характеризует скорость движения воды при установившемся режиме только для горизонта почвы, из которого взят образец. В природных условиях коэффициент фильтрации определяется водопроницаемостью наиболее плотных (и следовательно, наименее проницаемых) горизонтов в почвенном профиле.

Поскольку варьирование объёмного веса почвы под пологом леса невелико, оказалось возможным построение обобщенных кривых изменения объёмного веса с глубиной. Эти кривые построены для бурых почв под букняками – по данным 86 измерений, для перегнойно-карбонатных и бурых почв под дубравами — по 80 измерениям объёмного веса (Битюков, 1972, 1990, 1994, 2007). Для буковых лесов корреляционная зависимость объёмного веса (ρ г/см³) от глубины слоя (h см) имеет следующий вид:

$$\rho = 0,58 + 0,155 \ln h \quad (6).$$

Зависимость (6) оценивается высоким корреляционным отношением $\eta = 0,87 \pm 0,04$ со средней ошибкой уравнения $S = 0,08$ г/см³

Для дубрав аналогичная зависимость выглядит следующим образом:

$$\rho = 0,85 + 0,17 \ln h \quad (7).$$

Уравнение (7) оценивается корреляционным отношением $\eta = 0,89 \pm 0,03$ и средней ошибкой $S = 0,10$ г/см³. Таким образом, средний объёмный вес почв с глубиной возрастает по логарифмическому закону. При этом бурые лесные почвы под буковыми лесами по всему метровому профилю имеют плотность примерно на 30% меньше, чем перегнойно-карбонатные и бурые лесные почвы дубовых лесов. Ввиду достаточной тесноты корреляции зависимости (6) и (7) могут быть использованы в качестве расчётных.

Для расчета предельной полевой влагоёмкости получена следующая эмпирическая зависимость (при числе определений $n = 350$):

$$\text{ППВ} = \frac{403 \cdot \rho^2}{2,1 \cdot \rho} \quad \eta = 0,66 \pm 0,03 \quad S = 4,7 \% \quad (8);$$

здесь ППВ – предельная полевая влагоёмкость, % по объёму; ρ – объёмный вес г/см³. Зависимость имеет максимум влагоёмкости при объёмном весе около 1,0 г/см³. При дальнейшем уплотнении предельная полевая влагоёмкость уменьшается.

Уменьшение влагоёмкости при объёмных весах менее 1 связано с увеличением количества крупных пор, которые заполняются свободной гравитационной водой. При объёмном весе почвы более 1 общая пористость уменьшается, что определяет убывание предельной влагоёмкости.

Нами предпринята попытка установить зависимость фильтрационных свойств почвы от её объёмного веса путём послыонного определения этих параметров до метровой глубины почвенного профиля. Для бурых лесных почв под буковыми лесами произведено 92 определения условного коэффициента фильтрации (УКФ), а для дубрав – 150. Полученные результаты сведены в виде зависимостей $\text{УКФ} = f(\rho)$ в полулогарифмическом масштабе. Осреднение опытных точек позволило установить гиперболический вид зависимости: при малых плотностях почвы скорость фильтрации резко возрастает, а в нижней части асимптотически приближается к нулю при максимально возможных для данного типа почв объёмных весах. В пределах опытных точек для почв буковых лесов эта зависимость описывается уравнением:

$$\text{УКФ} = \frac{8,3 \cdot 10^6}{2,8 \rho \cdot 10^{5\rho}} \quad \eta = -0,87 \pm 0,02 \quad (9).$$

Для почв дубрав аналогичная зависимость имеет следующий вид:

$$\text{УКФ} = \frac{8,7 \cdot 10^6}{1,2 \rho \cdot 10^{6\rho}} \quad \eta = -0,68 \pm 0,05 \quad (10).$$

Здесь: УКФ в мм/мин., ρ – объёмный вес в г/см³.

Величины УКФ для почв дубрав значительно выше, чем для почв букняков, причём эта разница возрастает с уменьшением объёмного веса. Различие в УКФ для почв дубовых и буковых лесов является следствием неодинакового механического состава изучаемых почв.

Исследования показали (Битюков, 1988), что в буковых насаждениях, изреженных промышленными выборочными рубками 5 – 10 лет назад, площадь повреждённого почвенного покрова достигает 57% от общей. Восстановление структуры на повреждённых участках происходит медленно, при этом 15% площади имеют величины УКФ меньше 0,1 – 0,2 мм/мин. На участках добровольно-выборочных рубок значительные повреждения почвенного покрова распространены лишь на 18% площади при минимальном УКФ около 0,2 мм/мин., а остальные 82% площади имеют УКФ более 3 – 5 мм/мин.

В дубравах, на свежих сплошных вырубках 87% площади имеют значительные повреждения почвенного покрова. На долю второй категории повреждений приходится 46%, третьей – 41%; УКФ поверхностных горизонтов на таких участках уменьшается до 0,2 мм/мин. Средневзвешенный объёмный вес почв на этих вырубках составил 1,29 г/см³, а величина УКФ – 1,6 мм/мин.

Сравнивая общее количество влаги, которую способен вместить слой почвы глубиной 1 м в букняках и дубравах, можно отметить, что общая водовместимость почв в букняках на 120 мм выше, чем в дубравах. По свободной гравитационной влаге это превышение составляет 40 мм.

Для оценки гидрологической роли лесных площадей практическое значение может иметь водовместимость той части почвенного слоя, которая характеризуется впитыванием, превышающим интенсивность выпадающих осадков. Для буковых

Таблица 2

Координаты кривых обеспеченности модульных коэффициентов поверхностной инфильтрации

Индекс увлажнения, мм	Обеспеченность, % (доля площадок, где инфильтрация больше данной)										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	9S
$I_w=40$	5.15	3.30	1.25	0.75	0.55	0.40	0.30	0.25	0.22	0.20	0.15
$I_w=70$	3.50	2.25	1.40	1.08	0.90	0.75	0.66	0.58	0.50	0.40	0.38
$I_w=120$	3.75	2.77	1.30	0.95	0.80	0.71	0.65	0.60	0.52	0.40	0.37

лесов общая водовместимость метрового слоя почвы составляет 567 мм, а для дубрав в 50-см слое – 237 мм. По величине предельной полевой влагоёмкости – соответственно 470 и 209 мм. Следовательно, свободная гравитационная влага в наиболее проницаемой части почвенного профиля в букняках составляет 97 мм, а в дубравах – всего 28 мм, т. е. в 3,5 раза меньше. Таким образом, исследованиями объёмного веса и водно-физических свойств почв установлено, что площади под буковыми лесами способны регулировать ливни редкой повторяемости; почвы дубрав побережья в 3 раза слабее выполняют водорегулирующие функции. Несмотря на лучшую водопроницаемость поверхностных горизонтов почв, площади под дубравами не могут регулировать дренажным стоком ливни более 30 – 40 мм и интенсивностью более 0,1 мм/мин., в то время как почвы под буковыми насаждениями способны вместить осадков такой же интенсивности в 3 раза больше.

Впитывание и инфильтрация на элементарных водосборах. Ливневой сток является предметом многочисленных исследований. Наибольшую известность в отечественной литературе получили методы расчёта, предложенные Е.В. Близняком (1926), Г.Д. Дубелиром (1940), М.М. Протодяковым (1940, 1960), М.Ф. Срибным (1940), Д.Л. Соколовским (1945), Б.В. Поляковым (1946), Г.А. Алексеевым (1955), Е.В. Болдаковым и Н.Н. Чегодаевым (1959) и др.

Теории ливневого стока посвящены исследования Н.Е. Долгова (1916), М.А. Великанова (1931, 1948), Д.Л. Соколовского (1945), А.Н. Бефани (1949, 1958), Г.А. Алексеева (1966). Несмотря на наличие обширных исследований ливневого сто-

ка для равнины, сток в горных условиях изучен слабо. Так, для расчёта дождевого стока с малых водосборов Кавказа имеется лишь одна методика (Ростомов, 1956). Для Сочинского Причерноморья в силу специфичности условий района эта методика не подходит.

Наилучшее моделирование процессов впитывания достигается при дождевании с постоянной интенсивностью. Такие опыты были проведены Ф.П. Сериком (1940), С.А. Кодем (1950), С.Ф. Фёдоровым (1950), А.Н. Бефани и др. (1966, 1967, 1968). А.Н. Костяков (1931) предложил для расчёта коэффициента впитывания K_t в момент времени t следующую формулу:

$$K_t = \frac{K_0}{t^\alpha} \quad (11),$$

где: α – показатель степени, зависящий от характера почвы, а K_0 – коэффициент впитывания воздушно-сухой почвой в конце первой единицы времени.

Формула (11) применялась И.Н. Антиповым-Каратаевым, Е. И. Цыпленкиным, Н.Ф. Созыкиным и др. Г.А. Алексеевым (1948) теоретически рассмотрена наиболее простая модель инфильтрации воды в почву под действием сил тяжести и менисковых сил при залитой сплошным слоем воды поверхности и однородном грунте и получена следующая формула впитывания:

$$U = \frac{K}{W - W_0} \cdot \left(1 + \frac{h}{y}\right) \quad (12),$$

где: U – скорость просачивания; K – коэффициент фильтрации; $W - W_0$ – свободная пористость; $h = h_k + h_n$ (h_n – высота слоя воды на поверхности почвы, h_k – предельная высота капиллярного поднятия), y – положение фронта впитывания.

Более близка к реальным условиям схема, принятая Н.Ф. Бефани (1954), в виде двучленной степенной функции:

$$K_t = K_0 + \frac{A}{t^n} \quad (13).$$

Последние разработки в этом направлении, выполненные Н.Ф. Бефани (1967), позволили принять в качестве расчётной следующую формулу:

$$K_t = \left[K_0 + \frac{A}{(t+I)^n} \right] \cdot \mu \quad (14).$$

Здесь: K_t – интенсивность впитывания в момент времени t при уклоне I ‰, K_0 – установившаяся интенсивность впитывания при нулевом уклоне; A – параметр кривой впитывания при горизонтальной поверхности и заданной интенсивности дождя; n – показатель редукции; $\mu = e^{-0.002 i}$, где i – уклон склона в ‰, e – основание натуральных логарифмов.

По нашим исследованиям, ввиду большого варьирования на экспериментальных водосборах участков с различным впитыванием – от провального до нулевого (так, коэффициент вариации только мощности рыхлого слоя почв на стационаре равен 0,35) получить истинное значение интенсивности инфильтрации для всего бассейна не представляется возможным. Разработаны по экспериментальным данным кривые впитывания для водосбора площадью 8 га при различном предшествующем увлажнении, которые имеют следующие аналитические выражения (дефицит влаги в метровом слое почвы рассчитан как разность наименьшей влагоёмкости в этом слое $HВ=470$ мм и запасу влаги перед паводком).

$$1. \text{ При } \Delta W=0 \div 30 \text{ мм } K_t = 0,03 + \frac{2,0}{(t+1)^{0,75}} \quad (15).$$

$$2. \text{ При } \Delta W=30 \div 60 \text{ мм } K_t = 0,03 + \frac{8,0}{(t+1)^{0,91}} \quad (16).$$

$$3. \text{ При } \Delta W=60 \div 90 \text{ мм } K_t = 0,03 + \frac{25}{(t+1)^{1,07}} \quad (17).$$

$$4. \text{ При } \Delta W=90 \div 120 \text{ мм } K_t = 0,03 + \frac{52,4}{(t+1)^{1,15}} \quad (18).$$

При этом параметр A кривых впитывания зависит от дефицита влажности, причём кривая $A=f(\Delta W)$ аппроксимируется уравнением:

$$A = 1,34 e^{0,036 \Delta W} \quad (19).$$

Показатель редукции n также зависит от ΔW , эта зависимость в нижней и средней части близка к линейной. Благодаря тому, что бурые лесные почвы характеризуются большой водопроницаемостью и аккумулирующей ёмкостью, а также значительной крутизной склонов, дожди здесь почти никогда не образуют сплошного слоя воды на поверхности почвы. Поэтому интенсивность впитывания на малых водосборах определяется интенсивностью ливня.

Склоновый сток на элементарных водосборах. В зоне буковых лесов максимальные паводки не приурочены к определённому сезону, однако чаще бывают в период вегетации после выпадения интенсивных летних ливней. Зимние паводки имеют продолжительность от 60 – 110 час. и максимальные модули стока 16 – 219 л/сек. с км², а летние – значительно короче (16 – 50 час.) и выше (до 1934 л/сек. с км²). Время добегания на водосборе площадью 8 га составляет 70 – 250 мин., а скорость добегания паводковой волны склонового стока – от 2,6 до 15 м/мин. Коэффициенты стока за паводок на таком водосборе колеблются значительно. Так, по данным 52 паводков, наблюждённых в 1966 – 1969 гг. (до хозяйственного воздействия на лесной покров), средний паводковый коэффициент стока равен 4,4%, при $C_v=1,0$, $C_s=3,0$ и $E=10,2$, а средний максимум стока – 0,010 мм/мин. при $C_v=2,16$, $C_s=3,8$ и $E=15,5$.

Средняя величина стокообразующего дождя оказалась равной 50 мм ($C_v=0,62$, $C_s=1,1$), при его продолжительности 11,4 часа ($C_v=0,74$, $C_s=1,9$). В качестве примера приводим анализ обычного летнего паводка от ливня 98 мм, выпавшего 25 – 26 мая 1966 г. на увлажнённую почву со средней интенсивностью 0,04 мм/мин. и давшего слой паводка 2,4 мм. Максимальный за период наблюдений до рубки паводок прошёл 14 – 16 июня 1966 г. Непосредственно перед паводком, в период с 10 по 13 июня, шли дожди, составившие 150,7 мм и увлажнившие почву до величин наименьшей влагоёмкости (НВ). Прошедший ливень составил 122,7 мм, в течение 16 часов, прошёл со средней интенсивностью 0,13 мм/мин, при этом ядро ливня, обусловившее пик паводка редкой повторяемости, дало интенсивность 0,68 мм/мин. в течение 70 мин. (его слой составил 47,3 мм). Коэффициент склонового

стока за этот паводок достиг 17.5%, слой стока -21,5 мм, максимальный модуль -1934 л/сек. с км² (или 0,116 мм/мин.). За весь период наблюдений паводок в июне 1966 г. был единственным, после прохождения которого под пологом леса были отмечены следы поверхностного стока по тальвегам и уплотнённым местам в виде смытой подстилки и обнажённой поверхности почвы. Однако мутность воды в ручье не превышала 92 г/м³, хотя верхний бьеф водослива был заилен наполовину (около 0,2 м³ отложений из почвенно-грунтовых частиц, камней и остатков подстилки).

Паводки на водосборе площадью 12 га более продолжительны во времени (60 – 144 часа зимой и 14 – 96 часов летом) и более распластаны – максимальные модули стока в 3 раза меньше, чем на водосборе 8 га. Средний коэффициент стока за паводок (по данным 40 паводков) составляет 3,8% при $C_v=1.3$, $C_s=4.7$ и $E=24.6$. Наибольшая интенсивность стока в среднем равна 0,006 мм/мин при варьировании этого показателя $C_v=2.3$, асимметрии $C_s=5.5$ и эксцессе $E=30.0$. Максимальный коэффициент стока (32.2%), наблюдался 14 – 18 июня 1966 г.; максимум интенсивности стока – 0,080 мм/мин. Измеренная в этот паводок мутность воды в ручье составила всего 27,3 г/м³.

Анализом стока, наблюденного на водосборе с площадью 20 га, установлено убывание интенсивности стока Y_t в бездождный период, которое описывается обратной экспоненциальной функцией:

$$Y_t = 9,0 \cdot e^{-0,355\sqrt{t}} \quad (20),$$

где: e – основание натуральных логарифмов, t – время в сутках.

Фактическими наблюдениями уравнение (20) освещено в интервале $t=1-85$ дней, и к концу указанного периода расход воды в замыкающем створе водосбора составлял 0,9 л/сек., или $0,27 \cdot 10^{-3}$ мм/мин. Экстраполяция убывания стока по уравнению (20) даёт уменьшение стока до сотых долей л/сек. лишь на 350-е сутки. Таким образом, бассейновое регулирование при площади водосбора 20 га способно обеспечить его подземным питанием без дополнительных осадков примерно около года.

Математические модели склонового стока на элементарных водосборах. По результатам наблюдений за стоком на водосборах стационара

«Аибга» можно установить эмпирическую зависимость величины годового стока от площади бассейна (в пределах размеров бассейнов **притоков первого порядка**). Минимальное впитывание при полностью насыщенной влагой почве в среднем равно 0,030 мм/мин, что подтверждает значение K_0 для инфильтрационных кривых, приведенных выше. Таким образом, учтя полученные эмпирические зависимости, расчётную формулу для определения слоя склонового стока можно представить в следующем виде:

$$Y = X - 0,784T \cdot i_{cp} - 0,032 \Delta W - 6,86 \quad (21).$$

Здесь: Y – слой стока за паводок, мм; X – слой паводкообразующего ливня, мм; T – продолжительность ливня в мин; i_{cp} – его средняя интенсивность в мм/мин; ΔW – дефицит влаги в метровом слое почвы, мм.

Зависимость (21) оценивается коэффициентом множественной корреляции $R=0,74 \pm 0,07$, а средняя ошибка уравнения составляет $\pm 2,9$ мм.

Как показал анализ, форма гидрографа паводков, образованных летними ливнями, довольно устойчива, поэтому максимум интенсивности стока можно определить по величине слоя стока. Аналитические выражения для этих зависимостей следующие:

1) для водосборов до 10 га площадью

$$Y_{max} = 2,5 Y^{1,2} \eta = 0,934 \pm 0,014 \quad (22);$$

2) для водосборов до 12-15 га площадью:

$$Y_{max} = 1,85 Y \quad r = 0,984 \pm 0,005 \quad (23).$$

Таким образом, используя эмпирические зависимости (21) – (23), можно определить склоновый сток на малых горных водосборах в зоне буковых лесов в условиях, сходных со стационаром «Аибга». Максимум стока редуцируется площадью: для меньших водосборов он выше (при одинаковых слоях паводков). Поэтому выражение (22) может быть использовано для водосборов от 5 до 8 га, а выражение (23) – от 8 до 15 га.

Сложные условия формирования склонового стока в природном бассейне очень часто делают невозможным чисто физический или аналитический подход к определению стока. Поэтому возникает необходимость обращаться к эмпирическим зависимостям, полученным статистической обработкой наблюденных факторов, влияющих на сток. Такие зависимости, полученные непосредственно

для слоя стока, могут быть использованы только для тех бассейнов, по материалам которых выведены формулы, или же, с некоторыми допущениями – для водосборов со сходными физико-географическими условиями. Более общим являются зависимости для коэффициентов стока, т. е. величин стока в долях от осадков, поскольку они являются характеристикой интразональных факторов и легко обобщаются в региональном масштабе.

Методом наименьших квадратов были получены уравнения множественной корреляции, связывающие коэффициенты склонового стока с характеристиками стокообразующих ливней и фактором предшествующего увлажнения (для водосбора площадью до 8 га):

$$\alpha = 6,1 + 0,01 * X + 10,4 i_{\text{м.ч.}} - 0,1 * T_{\text{д}} - 0,064 \Delta W \quad (24),$$

$$R = 0,57, S = 2,9\%$$

Здесь: α – коэффициент стока за паводок, %; X – слой стокообразующего дождя в мм; $T_{\text{д}}$ – его продолжительность в часах; $i_{\text{ср}}$ – средняя интенсивность ливня в мм/мин; $i_{\text{м.ч.}}$ – максимальная часовая интенсивность ливня в мм/мин; ΔW – дефицит влаги в метровом слое почвы перед паводком; R – коэффициент множественной корреляции; S – ошибка уравнения. Из перечисленных факторов наибольшее влияние на коэффициент паводкового стока оказывает максимальная часовая интенсивность ливня – частный коэффициент корреляции достигает 0,37. В целом уравнение (24) позволяет рассчитать коэффициент стока с абсолютной ошибкой, не превышающей $\Delta\alpha = 2,7 \pm 2,9\%$, что можно считать удовлетворительной точностью при тех малых величинах коэффициента стока, которые наблюдаются в девственных буковых древостоев.

Множественной корреляцией были определены также уравнения для максимальной интенсивности стока (пика паводка) в зависимости от тех же факторов:

а) для водосборов площадью до 8 га

$$Y_{\text{max}} = 8,8 + 48,8 * i_{\text{ср}} + 48,3 * i_{\text{м.ч.}} - 0,18 * T_{\text{д}} - 0,25 * \Delta W \quad (25),$$

$$R = 0,73, S = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм/мин.}$$

$$Y_{\text{max}} = 6,5 + 0,28 * X + 47,3 * i_{\text{м.ч.}} - 0,63 * T_{\text{д}} - 0,24 * \Delta W \quad (26),$$

$$R = 0,76, S = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ мм/мин.}$$

б) для водосборов площадью 12 – 15 га:

$$Y_{\text{max}} = 0,17 * X - 0,088 * T_{\text{д}} - 0,006 * \Delta W + 8,27 * i_{\text{м.ч.}} - 4,66 \quad (27),$$

$$R = 0,58, S = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм/мин.}$$

$$Y_{\text{max}} = 12,2 + 34,2 * i_{\text{м.ч.}} - 0,18 * T_{\text{д}} - 0,19 * \Delta W - 5,9 * i_{\text{ср}} \quad (28),$$

$$R = 0,61; S = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ мм/мин.}$$

Здесь: Y_{max} – максимум паводка в тысячных долях мм/мин.

Наилучшую корреляцию Y_{max} имеет с коэффициентом стока α (0,77), затем – с максимальной часовой интенсивностью (0,60) и средней интенсивностью ливня (0,60).

Выводы:

Исследования генезиса стока на склонах под буковыми насаждениями позволяют отметить следующие его особенности:

Хорошие водно-физические свойства бурых лесных почв обуславливают интенсивное начальное впитывание и значительную аккумуляцию ливневых вод. В связи с этим под пологом леса редко возникает поверхностный сток, а проходящие паводки образуются в основном контактной составляющей склонового стока. Средние за паводок коэффициенты впитывания тесно увязываются с интенсивностью ливней, что является следствием отсутствия напорной фильтрации во время естественных дождей. Динамика впитывания определяется величиной предшествующего увлажнения почвы. При максимальном увлажнении коэффициент инфильтрации в почвоподстилающие грунты на стационаре близок к 0,03 мм/мин. Общий объём стока на водотоках стационара увеличивается с ростом площади водосбора по S-образной кривой. Аналогичной зависимостью описывается также увеличение коэффициентов годового стока в пределах величины водосбора до 20 га, причём при 20 га коэффициент стока достигает 60%. Склоновой сток на стационаре равен 4 – 6% от годовых осадков, в зимний период он выше -3,0+3,8%, а летом – в 2+3 раза меньше зимнего (1,5+2,8%).

Максимальные годовые модули стока на малых водосборах в зоне буковых лесов невелики – от 1,1 до 19,3 л/с с га, а усреднённые их значения под пологом нетронутого рубками леса равны 3,9...7,2 л/с с га. Коэффициенты паводкового стока не превышают 10% для зимних паводков и 5...7% – для летних. Наиболее интенсивные ливни дают паводки с коэффициентами стока до 25%. Средние за период наблюдений коэффициенты паводкового стока на малых бассейнах составляют: за зимний период – 2,3...8,4%, за летний – 0,8...4,8%,

при этом одинаковые осадки за паводок (в среднем 71...81 мм) дают зимой паводки больше в 1,8 раза, чем летом. Максимальная наблюдаемая интенсивность стока – 0,08 мм/мин.

Для расчёта коэффициентов паводкового склонового стока на малых бассейнах в зоне буковых лесов предлагаются эмпирические зависимости, учитывающие предварительное увлажнение бассейна и график паводко-образующего дождя. Следует учесть, что в условиях легко проницаемых с поверхности лесных почв преобладающее влияние на склоновый сток имеет форма графика дождя, которая в естественных условиях может быть самой различной, и учесть её в прогностических расчётных зависимостях очень трудно.

Литература

1. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Тр. Одесского гидрометинститута. Вып. 14. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 310 с.
2. Бефани А.Н., Урываев П.А., Бефани Н.Ф., Одрова Т.В., Федорей В.Г. Экспериментальные исследования дождевого стока в Приморье / Труды ДВНИГМИ. Вып. 22. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 315 с.
3. Битюков Н.А. Речной сток в условиях Черноморского побережья Кавказа // Докл. Соч. отд. Геогр. общ-ва при АН СССР. Вып. 2, 1971. С. 184 – 189.
4. Битюков Н.А. Гидрологическая роль горных лесов Северо-Западного Кавказа // Лесоведение, 1996. № 4. С. 39 – 50.
5. Битюков Н.А. Влияние буковых насаждений на дождевые осадки // Тр. Сочинской НИЛОС. 1971. Вып. 6. Соч. С. 33 – 40.
6. Битюков Н.А. Водный баланс водосборов в связи с рубками в буковых лесах Северного Кавказа // Лесоведение, 1988, № 3. С. 56 – 65.
7. Битюков Н.А. Методические принципы изучения гидрологической роли горных лесов. // Проблемы лесоведения и лесной экологии : Тез. докл. АН СССР, Госкомлес СССР. М., 1990. С. 8 – 11.
8. Битюков Н.А. Экология горных лесов Причерноморья. Сочи: ФГУ НИИгорлесэкол, 2007. 397 с.
9. Битюков Н.А. Мониторинг экосистем буковых лесов Сочинского Причерноморья // Монография // Научные труды Сочинского национального парка. Вып. 5 ISBN 978589-204-228-4 391 с.
10. Битюков Н.А., Шагаров Л.М. Мониторинг атмосферных осадков в буковых лесах Черноморского побережья Кавказа. Статья // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. № 1. 2013 С. 67 – 71.
11. Битюков Н.А. Ландшафтное районирование Сочинского национального парка // Статья РГО Вестник Краснодар. регион. отделения РГО. Краснодар: Платонов. Вып. 6. 2012.
12. Битюков Н.А., Пестерева Н.М., Ткаченко Ю.Ю., Шагаров Л.М. Рекреация и мониторинг экосистем Особо Охраняемых природных территорий Северного Кавказа: // Сочи: ГОУ ВПО СГУ, 2012. - 456 с., с ил. Монография ISBN: 978-5-91789-110-1
13. Коваль И.П., Битюков Н.А. и др. Состояние почвенного покрова и изменение водорегулирующих функций горных лесов в связи с рубками. Сб. научн. трудов. Вып. 11., М., ВНИИЛМ, 1976.
14. Коваль И.П., Битюков Н.А. Экологические основы пользования лесом на горных водосборах (на примере Северного Кавказа). Краснодар, 2001, 408 с.
15. Коваль И.П., Битюков Н.А. Экологические функции горных лесов Северного Кавказа. М.: ВНИИЦлесресурс, 2000. 480 с.
16. Коваль И.П., Битюков Н.А. Шевцов Б.П. Экологические основы горного лесоводства // Монография. Сочи: ФБГУ «НИИгорлесэкол», 2012. 565 с. ISBN: 978-5-91789-104-0 с.
17. Ревут И.Б. Физика почв. Л.: Изд. «Колос», 1972. 365 с.
18. Юмина Н.М. Паводочный сток рек Северного Кавказа // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2008. № 2. С. 51 – 56.