

Научные сообщения

УДК 551.435.2:556.5.01(-924.85/.86)

© 2019 г. Н.И. КОРОНКЕВИЧ, С.В. ДОЛГОВ

О ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ РОЛИ РЕЛЬЕФА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ
РУССКОЙ РАВНИНЫ*Институт географии РАН, Москва, Россия**E-mail: hydro-igras@yandex.ru*

Поступила в редакцию 09.06.2018

После доработки 20.02.2019

Принята к печати 19.03.2019

На примере южной части Русской равнины рассмотрены поверхностный склоновый сток, сток с площади гидрографической сети и речной сток в период весеннего половодья. На основании анализа данных воднобалансовых станций и “привязки” величин поверхностного склонового стока с разных угодий к величине зонального речного стока в районе расположения этих станций определены зональные значения весеннего поверхностного склонового стока с отдельных угодий, расположенных на суглинках и супесях. В составе угодий выделены поля с зяблевой пахотой и нераспаханные осенью (стерня, залежь, озимые, многолетние травы). Почва при зяблевой пахоте к началу половодья разрыхлена и уменьшает сток по сравнению с полями, нераспаханными осенью, почва которых уплотнена к началу половодья. К тому же микрорельеф, создаваемый при зяблевой пахоте, также способствует снижению стока. Наименьший же поверхностный склоновый сток имеет место под лесом. Различия в стоке возрастают в направлении от южной части лесной зоны к степным районам. С учетом состава угодий и механического состава почв получены средневзвешенные значения поверхностного склонового стока за период исчисления нормы речного стока (конец XIX в.—начало 1960-х гг.). Показано, что в последующем происходило уменьшение весеннего поверхностного склонового стока, вначале в результате роста площадей зяблевой пахоты, а в последнее время главным образом в результате изменения метеорологических условий, особенно в холодный период года (повышение температуры воздуха, учащение оттепелей, усиление инфильтрации). В общей структуре весеннего речного половодья, величина которого снизилась в последние десятилетия, наряду с уменьшением доли поверхностного склонового стока происходит увеличение доли поверхностного стока, формирующегося на площади гидрографической сети, и особенно стока инфильтрационного происхождения (верховодка и подземный сток). Наиболее существенно изменилась структура речного стока в степной зоне.

Ключевые слова: элементы рельефа, зяблевая пахота, нераспаханные осенью поля, половодье, поверхностный сток.

<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019346-56>

ON THE HYDROLOGICAL ROLE OF THE RELIEF IN THE SOUTHERN PART OF THE RUSSIAN PLAIN

N.I. KORONKEVICH, S.V. DOLGOV

*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia
E-mail: hydro-igras@yandex.ru*

Received 09.06.2018

Revised 20.02.2019

Accepted 19.03.2019

S u m m a r y

On the example of a southern part of the Russian Plain the surface slope runoff, the runoff from the hydrographic network and snow melt river runoff are considered. Based on the analysis of the data by water balance stations and the correlation of surface slope runoff values from different lands to the zonal river runoff value, the zonal values of the spring surface slope flow from separate lands located on loam and sandy loam soils are determined. Within agricultural lands there are fall plowed fields and non-plowed in autumn (stubble, layland, winter crops, perennial grasses). By the beginning of the spring flood, the soil at autumn-plowed fields is loosened and reduces the runoff, while on the fields that were not plowed in the autumn soil is compacted. In addition, the microtopography created by autumn plowing also contributes to the runoff reduction. The smallest surface slope runoff occurs under the forest. Differences in runoff increase in the direction from the southern part of the forest zone to the steppe areas. Taking into account the land composition and the mechanical composition of the soils, the weighted average values of the surface slope runoff were obtained for the period of the long-time average annual flow calculation (late 19th century and early 1960s). It is shown that subsequently there was a decrease in the spring surface slope runoff, initially as a result of the autumn plowing increase, and more recently, mainly as a result of changes in meteorological conditions, especially during the cold season (air temperature rising, frequent thaws, increased infiltration). In the overall structure of the spring river flood, along with a decrease in the share of surface slope runoff, the share of surface runoff formed in the hydrographic network increases, and especially the flow of infiltration origin (verhovodka and underground runoff). In the steppe zone the structure of river flow has changed most significantly.

Keywords: relief elements, autumn plowing, non-plowed in autumn fields, spring flood, surface slope runoff, runoff from the area of the hydrographic network, runoff of infiltration origin.

Введение

Несомненно, рельеф является одним из важнейших факторов формирования стока. Данной теме посвящено большое число публикаций, в том числе применительно к территории южной части Русской равнины [1–12]. Тем не менее, остается ряд недостаточно изученных и дискуссионных вопросов. Авторы в течение многих лет занимались исследованиями формирования стока на водосборах рассматриваемой территории, преимущественно анализируя данные воднобалансовых (стоковых) станций и обобщающие их публикации, и сталкивались с необходимостью учета геоморфологических особенностей при оценке различных составляющих стока, в первую очередь поверхностного. Частично это отражено в работах [13–15]. В данной статье мы рассматриваем некоторые общие представления о влиянии рельефа на сток с водосборов южной части Русской равнины. В первую очередь — на *поверхностный сток* на склонах (включая плакоры) крутизной преимущественно менее 3–4° (преобладающие уклоны на сельскохозяйственных полях), и *сток с площади гидрографической сети* (участков, расположенные ниже бровок речных долин, оврагов, балок, лощин) в весенний период — основную гидрологическую фазу рассматриваемой территории. Затем анализируется динамика стока со склонов и гидрографической сети в результате современного изменения климата и хозяйственной деятельности.

Некоторые общие представления о гидрологической роли рельефа

Гидрологическая роль рельефа во многом определяется *крупностью* его форм. Макрорельеф коренным образом изменяет весь комплекс физико-географических факторов, а, следовательно, и условий формирования водного баланса, стока, эрозионных процессов. На равнинных территориях, таких как Русская равнина, *высота* местности — один из ведущих факторов годового количества осадков, общей структуры водного баланса. Но не менее важна роль мезо- и микрорельефа, значение которых проявляется, прежде всего, в перераспределении осадков в холодное время года. Во время метелей и позёмок снег с возвышенных участков сносится в отрицательные формы рельефа, где снегозапасы обычно значительно превышают аналогичную величину на *склонах* выше бровки гидрографической сети.

Условия формирования стока на площади, занимаемой *гидрографической сетью*, специфичны. Близкое залегание к земной поверхности грунтовых вод, смывы и намыты бесструктурные почвы, способствуют тому, что такие территории отличаются высокими коэффициентами стока. По этой причине именно размер площади гидрографической сети определяет (по [16]) величину поверхностного стока в летний период на большей части ЕТС. С другой стороны, весной, в результате больших снегозапасов, почва на площади гидрографической сети, как и в других отрицательных формах рельефа, меньше промерзает, чем на склонах, что благоприятствует инфильтрации.

Чрезвычайно велика гидрологическая роль различного рода замкнутых депрессий, в которых аккумулируется значительная часть стока и “действующая” площадь водосбора может быть заметно меньше формальной, указываемой в различных статистических справочниках. Важное обстоятельство, усиливающее гидрологическую роль замкнутых углублений, заключается в том, что при водопроницаемых почвогрунтах они заполняются неоднократно, то есть их *динамическая емкость* значительно больше *статичной*. Это особенно актуально для понимания гидрологической роли микрорельефа, единовременная динамическая емкость отрицательных форм которого иногда достигает нескольких десятков мм, хотя чаще всего не превышает 10 мм.

Наряду с гидрографической сетью крупные замкнутые отрицательные формы рельефа, сосредотачивающие в себе большие объемы воды, служат, особенно в лесостепных и степных районах, “потускулами” (по выражению Г. Н. Высоцкого [17]), то есть очагами питания подземных вод в условиях непромывного или периодически промывного водного режима на большей части рассматриваемой территории.

Влияние *уклона склона* на сток принадлежит к числу вопросов, которые до сих пор дискутируются в гидрологии. При этом давно выявились две главные позиции. Сторонники одной из них [3, 5] считали, что влияние крутизны склона на сток в условиях преобладающих ее значений на равнинах незначительно. Поэтому нет необходимости вводить поправки на различия в уклоне при обобщении данных стокowych (воднобалансовых) станций и других результатов наблюдений за поверхностным склоновым стоком. Другая точка зрения, напротив, исходит из значительной роли уклона в формировании стока, выражающейся в существенном увеличении коэффициента стока с ростом уклонов. Отсюда необходимость введения поправок на крутизну склона при обобщении данных по склоновому стоку. Одним из наиболее последовательно отстаивающих эту точку зрения был В. Е. Водогрецкий [6]. Вместе с тем, имеются публикации [9], свидетельствующие о наличии в ряде случаев заметной обратной связи стока с крутизной склона.

Представляется, что дискуссионность вопроса в основном определяется смешением понятий и неодинаковыми условиями опытов. Разные исследователи, говоря об уклонах, по существу вкладывают разный смысл в их гидрологическую роль. В одних случаях имеется в виду непосредственное влияние уклонов на сток при прочих равных условиях, в других — в сочетании с рядом факторов (в первую очередь, некоторыми свойствами почвенного покрова), обусловленными различиями в крутизне склонов. То, что при прочих равных условиях рост уклонов должен увеличивать сток, так как с участков большей крутизны вода стекает быстрее и меньше возможностей для ее впитывания в почву и испарения, очевидно. Вопрос в том, насколько существенно это влияние. М. И. Львович [3] показал, что степень

этого влияния определяется соотношением периодов установившегося и неуставившегося режимов формирования стока. В условиях установившегося режима, характеризующегося значительным превышением времени поступления воды на склон над временем добегания ее до замыкающего створа, сток практически не зависит от уклона, поскольку определяется соотношением интенсивности поступления воды на склон в результате дождя или снеготаяния и интенсивности впитывания, почти не зависящих при одинаковых почвах от крутизны склона. Влияние уклона существенно сказывается в условиях неуставившегося режима, характеризующегося малым соотношением времени поступления воды на склон и времени ее добегания до замыкающего створа. Особенно типичен он для фаз начала и спада стока, когда сказывается разное время добегания воды до замыкающего створа. Но в реальных условиях формирования стока, особенно снегового, период установившегося режима явно преобладает над периодом неуставившегося режима. Поэтому следует ожидать в целом незначительного непосредственного влияния уклонов на склоновый сток.

Что касается косвенной роли, то следует иметь в виду, что в процессе развития рельефа на участках с разными уклонами сформировались разные природные комплексы. Так, на участках с малой крутизной несколько больше емкость отрицательных форм рельефа, что способствует снижению стока. Но, прежде всего, различия в уклонах сказались на почвенном покрове, влияние которого на сток, как было показано М. И. Львовичем [3], значительно превышает непосредственное влияние уклона на сток. На участках с большими уклонами из-за большей кинетической энергии стекающей воды сформировались более смытые почвы. Это двояко сказалось на условиях инфильтрации и стока. С одной стороны, способствовало увеличению стока, ухудшая структуру почвы, снижая содержание гумуса, ее порозность. С другой стороны, большая кинетическая энергия стекающей воды способствует уменьшению стока, приводя к росту содержания фракций песка и к снижению содержания глинистых и илистых частиц, а, следовательно, к снижению влагоемкости почвы и ее влажности. Причем первый процесс — увеличения стока, в соответствии с гидрологической ролью физических свойств почвы должен быть более выражен на структурных почвах тяжелого механического состава, а второй — уменьшения стока, на почвах бесструктурных, легких по механическому составу.

Влияние почвенного фактора (механического состава почвы) на связь поверхностного стока с уклоном склона в общем виде можно представить графиком (рисунок). При самых малых уклонах, когда смытость почвы повсеместно невелика, рост стока с увеличением крутизны склона на почвах с разным механическим составом обусловлен непосредственным влиянием уклона, в дальнейшем вступает в силу разный механизм влияния смытости почвы на ее инфильтрационные свойства.

Неоднозначно влияют на сток и коэффициент стока различные сочетания участков, отличающихся уклонами и другими факторами, в первую очередь метеорологическими, и такой характеристикой рельефа, как *экспозиция склона*. Для более сложных водосборов, чем склон, на одну из первых ролей в формировании снегового стока выдвигается дружность снеготаяния. Разновременность снеготаяния на более расчлененных и обладающих большими средними уклонами водосборах может привести к снижению коэффициента стока по сравнению с менее расчлененными, с меньшими уклонами водосборами, на которых снеготаяние происходит более дружно. На дружность снеготаяния влияет и зависимость от рельефа *форма водосбора*. Дружному снеготаянию способствуют округлые формы водосбора, растягиванию во времени — вытянутые.

Влияние *длины склона* на сток и водный баланс также дискуссионно. В гидрологической роли этого фактора много общего с гидрологической ролью уклона. При прочих равных условиях, чем больше время пребывания воды на склоне, то есть

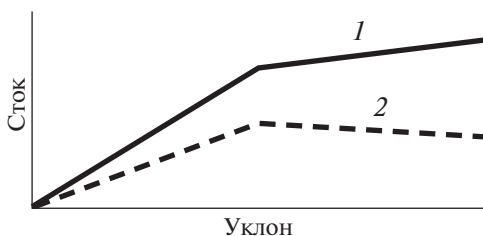


Рис. Влияние механического состава почвы на связь поверхностного стока с уклоном склона
Сток: 1 — на суглинках, 2 — на супесях

чем длиннее склон, тем больше вероятность потерь стока. Но, как и в случае с уклонами, на склонах разной длины формируются почвы с неодинаковой инфильтрационной способностью. Большие объемы воды на длинных склонах способствуют формированию здесь в целом более смытых почв со всеми вытекающими отсюда последствиями. Моделью сказанного может служить любой склон на местности, если рассматривать его в целом и отдельно верхнюю часть. Известно, что верхние части склонов (модель более короткого участка) обычно, особенно для прямых и выпуклых склонов, менее смыты, чем нижние и, следовательно, склон в целом (модель более длинного участка). Таким образом, и на участках с разной длиной склона вполне правомерно ожидать неоднозначных связей со стоком.

Говоря о гидрологической роли отдельных элементов рельефа важно подчеркнуть, что в природе все факторы действуют одновременно, образуя многочисленные сочетания в пространстве и во времени. Это постоянно следует иметь в виду, “вырывая” отдельные компоненты природы из всеобщей связи. В одних условиях на первый план выходят одни факторы, в других — другие. Вносит свой вклад во все эти сложные взаимодействия и деятельность человека, особенно масштабно проявляющаяся в изменении микрорельефа на сельскохозяйственных полях.

Объекты и методы исследований

С гидрологических позиций наибольший интерес представляют сток со склонов и с площади гидрографической сети. Поверхностный сток со склонов к тому же важно знать и для решения актуальных задач его уменьшения для пополнения запасов почвенной влаги в засушливых районах и борьбы с эрозией. Одним из наиболее известных путей определения поверхностного склонового стока является использование данных стоковых площадок воднобалансовых (стоковых) станций. В 1960—1980-х гг. действовали следующие станции. На суглинистых и глинистых почвах в лесной зоне европейской части страны располагались Тосненская, Прибалтийская, Загорский стационар, Подмосковная, агрометеостанция “Собакино”, Барыбинский стационар; в лесостепной зоне — Новосильская, Придеснянская, Курский стационар, Нижнедевицкая, обсерватория “Каменная степь”, стационар Института сельского хозяйства Центрально-черноземной полосы, Балашовская, Богуславская, Вязовский стационар, Тимашево, Кинель; в степной зоне — Поволжская АГЛОС, Энгельская, Толстовская, Ершовский стационар, Камышинский опорный пункт, Волгоградское опытное хозяйство, Персиановская, Дубовская, на юге Западной Сибири Бурли, а в северо-западном Казахстане — Западно-Казахстанская и Новорыбинская. На супесчаных и песчаных почвах располагались Валдайская (ВНИГЛ), Подмосковная, стационар Прокудин Бор, Западно-Казахстанская, Кустанайская. Подробная характеристика этих станций дана в работе [13].

Стоковые площадки отдельных станций весьма сильно отличаются по конструкции, продолжительности наблюдений, уклонам, длине, экспозиции и форме склонов, составу почв, агрофону. Для обобщения всей этой весьма разнородной информации был предложен следующий прием [13]. Данные стоковых площадок более 30 воднобалансовых станций были разделены по механическому составу почв и по агрофону — вспаханные с осени (зябь) и прочие поля, которые к началу весеннего снеготаяния не распаханы, и почва под ними уплотнена. Кроме того, выделены площади под лесом. Главное же состояло в том, что величина стока со всех выделенных категорий земель была “привязана” к величине среднего многолетнего зонального стока речного половодья в районах расположения воднобалансовых станций. Это дало возможность получить хорошо выраженные зонально-межзональные связи стока с отдельных угодий со стоком речного половодья, по которому имеются длинные ряды наблюдений. Среднее квадратическое отклонение данных по стоку отдельных станций от осредненных значений составило по зяби 11.2 мм, а на полях с уплотненной к весне почвой — 15 мм. Зная соотношение полей с разным механическим составом и структурой угодий в том или ином регионе, несложно определить и картографировать средний взвешенный склоновый сток.

Изменения стока в 1960–1980-х гг. рассчитаны по данным большинства указанных выше воднобалансовых станций, но к настоящему времени значительное их количество было закрыто или стало работать по сокращенной программе. Поэтому изменения за последние десятилетия определены в основном по данным трех станций Всероссийского научно-исследовательского института агролесомелиорации (ВНИАЛМИ) — Новосильского стационара в лесостепной зоне, Поволжского и Волгоградского расположенных в степной зоне [15].

Структура речного стока за период исчисления его нормы с учетом поверхностного склонового стока, стока с площади гидрографической сети, стока верховодки и подземного стока взята из работы [13]. Ее изменение за последние годы определено следующим образом:

- определялось современное изменение полного речного стока за половодье по [18, 19];
- доля современного подземного стока за половодье устанавливалась по [19];
- вычитанием из современного полного стока за половодье подземного стока находилась современная поверхностная составляющая речного стока, включающая в себя поверхностный склоновый сток, сток верховодки и сток с площади гидрографической сети;
- из поверхностной составляющей вычитался сток с гидрографической сети. Последний принимался таким же, как и для периода исчисления нормы стока, поскольку некоторое снижение интенсивности ветрового сноса снега из-за учащения оттепелей, по-видимому, компенсируется его увеличением из-за большей в целом площади зяблевой пахоты, с которой снег сдувается сильнее, чем с прочих угодий;
- современный поверхностный склоновый сток определялся уменьшением в N раз в результате сопоставления этого стока за период исчисления нормы стока и за современный период;
- разница между поверхностной составляющей речного стока и стоком с площади гидрографической сети и поверхностного склонового стока отнесена к стоку верховодки;
- полученный сток верховодки в сумме с ранее определенным подземным стоком характеризует сток инфильтрационного происхождения.

Результаты и их обсуждение

Зональные значения весеннего поверхностного склонового стока и их изменение. Величины зонального среднееголетнего речного стока за период с конца XIX столетия до 1960-х гг. XX столетия, характеризуют, согласно К. П. Воскресенскому [20], норму речного стока за этот период. К этому периоду отнесены и значения поверхностного склонового стока, полученные по графику связи с величиной зонального речного стока половодья (табл. 1 и 2-й столбец табл. 2).

В табл. 1 и 2 значения среднего многолетнего стока речного половодья 100–120 мм соответствуют южной части лесной зоны, 60–80 мм — лесостепи, 20–40 мм — степной зоне Русской равнины. Наименьший поверхностный склоновый сток присущ лесным угодьям, далее следует зябь (разрыхленная к началу снеготаяния почва с микрорельефом, способствующим задержанию стока). Наибольший сток отмечается на нераспаханных с осени полях (стерня, озимые, залежь, многолетние травы), под которыми почва к началу снеготаяния уплотнена. Поверхностный сток на суглинистых почвах существенно выше, чем на супесчаных.

Во втором столбце табл. 2 представлены средневзвешенный поверхностный склоновый сток с пашни с учетом структуры почв и угодий. Это, конечно, весьма осредненные значения. На большей части рассматриваемого региона склоны северной экспозиции имеют большие снегозапасы, и таяние снега на них происходит при более высоких температурах воздуха. Это обуславливает повышенные значения поверхностного стока по сравнению со склонами южной экспозиции. В. П. Герасименко [8] предложил в осредненные значения вводить коррективы на экспозицию склона (северная — 1.25, южная —

Таблица 1

Связь величины весеннего поверхностного склонового стока с отдельных угодий с величиной среднего многолетнего стока половодья за период исчисления нормы речного стока (по К. П. Воскресенскому [20])

Средний многолетний сток половодья на реках за период с конца XIX в. до начала 1960-х гг., мм	Поверхностный склоновый сток, мм					
	на суглинистых почвах			на супесчаных почвах		
	лес	зьябь	поля, не распаханые с осени	лес	зьябь	поля, не распаханые с осени
120	35	80	92	3	19	37
100	27	63	81	1	17	32
80	18	48	71	0	13	28
60	8	31	61	0	9	23
40	4	18	48	0	6	20
20	0	5	32	0	3	17

Таблица 2

Связь величины средневзвешенного (с учетом структуры угодий и механического состава почв) поверхностного склонового стока с величиной среднего многолетнего стока половодья за период исчисления его нормы, мм

Средний многолетний сток половодья на реках за период с конца XIX в. до начала 1960-х гг.	За период исчисления нормы стока на сельскохозяйственных угодьях	За период с начала 1960-х гг. до начала 1990-х гг. с сельскохозяйственных угодий	Современный с сельскохозяйственных угодий с начала 1990-х гг.
120	83	75	65
100	73	58	36
80	62	46	23
60	48	33	15
40	39	21	9
20	25	5	2

0.75, северо-западная и северо-восточная — 1.12, юго-западная и юго-восточная — 0.88, западная и восточная — 1.10), на тип почвы (10–20%), на смытость почвы (для несмытых и слабосмытых поправочный коэффициент — 0.94, для средне- и сильносмытых — 1.10).

Если сравнивать удельный слой (в мм) общего склонового стока (с учетом лесных участков) с речным стоком за период половодья, то оказывается, что в южной части лесной зоны он составляет 40% (50% поверхностной составляющей), в лесостепной зоне 55–60% (65–70%). В степной зоне он в 2.5–3 раза и более 3 раз выше речного стока. Если же учитывать поверхностный склоновый сток (при том, что на склоны и плакоры приходится 75–85% всей территории), участвующий в речном стоке (за вычетом задержания в замкнутых отрицательных формах рельефа), то в южной части лесной зоны его доля снижается до 25–30% (30–35%), в лесостепной до 40% (45–50%), в степной до 50% (50–55%). Это объясняется тем, что в лесной зоне в формировании речного стока большую роль играет верховодка, особенно под лесом, которая не учитывается стоковыми площадками. В лесостепной зоне, преимущественно в южных ее частях, верховодка не имеет столь существенного значения, как в лесной зоне, еще меньше ее роль в степ-

ных районах. Зато по мере уменьшения слоя стока возрастает значение замкнутых отрицательных форм рельефа, перехватывающих часть поверхностного склонового стока на пути к реке.

Половодье в лесостепной и степной зонах в период исчисления нормы стока в основном формировалось за счет поверхностного стока, причем примерно в равной пропорции — склоновым стоком и стоком с площади гидрографической сети. Правда, в годы различной водности это соотношение нарушалось, особенно в южных районах. В маловодные годы сток со склонов или отсутствовал, или почти полностью задерживался в замкнутых отрицательных формах рельефа и на участках с повышенными инфильтрационными свойствами почв, тогда как в многоводные годы склоны давали в степной зоне 50–60% и более полного речного стока.

Начиная с 1960-х гг. произошли существенные изменения стока с сельскохозяйственных угодий (столбцы 3 и 4 табл. 2). С начала 1960-х до начала 1990-х гг. поверхностный склоновый сток уменьшался в основном за счет развития агротехники и увеличения площади зяблевой пахоты, которая занимала 40–60% водосборной территории. А в последние десятилетия (по настоящее время) — из-за изменений метеорологических условий — учащения оттепелей, меньшего промерзания почвы, способствующих увеличению инфильтрации и росту подземного стока в реки и водоемы, а также сокращения площадей под зяблевой пахотой. Зато увеличился склоновый сток верховодки и общий сток инфильтрационного питания. Зона непромывного водного режима (по А.А. Роде [21]) заметно сдвинулась к югу.

Сток с площади гидрографической сети. Площадь гидрографической сети в южной части Русской равнины составляет в среднем 15–25% всей территории. В первом приближении можно считать, что примерно одну треть общей площади гидрографической сети занимают овраги и балки [13]. В этой же работе приводятся обобщенные данные, согласно которым средние максимальные снегозапасы в овражно-балочной сети превышают аналогичную их величину на склонах лесостепной зоны в 2.5 раза, степной — 3, лесной — 1.5 раза. На остальной площади гидрографической сети это превышение составляет соответственно 1.1, 1.2 и 1.05 раза. Период снеготаяния в овражно-балочной сети в 1.1–1.5 раза продолжительней, чем на склонах. Примерно в такое же число раз здесь больше и количество осадков за период снеготаяния, коэффициент стока которых близок к коэффициенту стока тающего снега. Кроме того, следует учитывать, что часть стока с площади гидрографической сети в период половодья образуется сразу после окончания снеготаяния в результате выпадения жидких осадков на водную или переувлажненную поверхность.

Сопоставление удельных значений снегозапасов, сложенных со стокообразующими осадками, для склонов и гидрографической площади свидетельствует, что в южной части лесной зоны Русской равнины они в среднем в 1.2–1.3 раза больше, чем на склонах, а в лесостепных и степных районах — в 1.5–1.6 раза. При коэффициентах стока с площади гидрографической сети в южной части лесной зоны 0.8–0.9, в лесостепи 0.5–0.7 и около 0.5 в степной зоне за период исчисления нормы речного стока в ее пределах формировалось соответственно 20–30%, 35–45% и 45–50% общего стока половодья [13].

Как отмечено выше, в настоящее время сток с площади гидрографической, по-видимому, мало изменился по сравнению с периодом исчисления нормы стока. Но доля участия стока с площади гидрографической сети в общем стоке половодья возросла, во всяком случае, в его поверхностной составляющей, в том числе в результате уменьшения общего стока половодья в южной части Русской равнины.

Общая структура стока половодья. За период исчисления нормы речного стока элементы его структуры в период половодья следующие: в южной части лесной зоны на поверхностный склоновый сток и сток с площади гидрографической сети приходилось примерно по 25% общего стока половодья, остальной объем (50%) составил сток инфильтрационного происхождения (в основном верховодка, а также базисный подземный сток). В лесостепи соответственно по 30–40% и 20–40%, в степной зоне (за вычетом приблизительно 10% стока инфильтрационного происхождения) по 45% составлял поверхностный склоновый сток и сток с площади гидрографической сети [13].

Изменение структуры стока в период весеннего половодья (%)

Зона	Период исчисления нормы стока			Современный период		
	поверхностный склоновый сток	поверхностный сток с площади гидрографической сети	подземный сток и верховолка	поверхностный склоновый сток	поверхностный сток с площади гидрографической сети	подземный сток и верховолка
Южная часть лесной	29	28	43	20	30	50
Лесостепь	33	32	35	14	40	46
Степная	50	42	8	13	70	17

В настоящее время общий сток половодья снизился, по сравнению с периодом исчисления его нормы, в среднем на 10–40% [18, 19]. Это произошло, главным образом, за счет поверхностного склонового стока, который, как было показано выше (табл. 2), уменьшился в 1.3–2 раза в южной части лесной зоны, в 3 раза в лесостепи, в 5–10 раз в степной зоне. Как видно из табл. 3, при уменьшении в современный период стока речного половодья доля поверхностного склонового стока снизилась, соответственно, на 30%, 60% и почти в 4 раза. А доля стока с площади гидрографической сети возросла на 5–10%, 25% и в 1.7 раза. Участие стока инфильтрационного происхождения увеличилось соответственно на 15–20%, 30% и более, чем в 2 раза в степных районах.

Конечно, приведенные величины весьма ориентировочны, но они достаточно отчетливо отражают современную тенденцию, прежде всего резкого снижения участия поверхностного склонового стока в речном и возрастания роли площади гидрографической сети. В то же время значительно увеличился сток инфильтрационного происхождения при общем снижении стока речного половодья и его участия в годовом речном стоке.

Выводы

1. Отдельные элементы рельефа, такие как уклон, длина, экспозиция склона, неоднородно влияют на сток в разных природных условиях, что послужило основанием для зонально-межзонального обобщения наблюдений воднобалансовых станций.
2. В условиях южной части Русской равнины особый интерес с гидрологических позиций вызывает соотношение поверхностного стока со склонов (включая плакоры) и стока, формирующегося на площади гидрографической сети, а также его динамика во времени.
3. Анализ данных воднобалансовых станций, “привязанных” к величине зонального стока речного половодья, позволил определить величину поверхностного склонового стока за период исчисления нормы речного стока (конец XIX в.—начало 1960-х гг.), в 1980-е гг. (время наибольшего агротехнического воздействия на сток) и за современный период. Выявлены существенные различия в стоке с отдельных угодий, в том числе с зяби (осенняя пахота под яровые культуры) и полей, нераспаханных с осени. Сток с зяби намного, особенно в лесостепной и степной зонах, меньше, чем с этих полей.
4. Установлена тенденция уменьшения склонового стока по сравнению с периодом исчисления нормы речного стока. Вначале это в основном было вызвано ростом уровня агротехники и расширением площади зяблевой пахоты, а в последнее время потеплением климата.

5. Площадь, занимаемая гидрографической сетью, обладает повышенным стоком из-за больших снегозапасов в холодный период года и более длительного периода снеготаяния. Несмотря на гораздо меньшую площадь по сравнению со склонами (включая плакоры) объем стока с нее близок к объему стока со склонов в период исчисления нормы стока и в отличие от склонового стока гораздо меньше менялся со временем.
6. В настоящее время (по сравнению с периодом исчисления нормы речного стока) вклад средневзвешенного, поверхностного склонового стока (с учетом состава углей и почвогрунтов) снизился в среднем почти в 1.5 раза в южной части лесной зоны, в 2.4 раза в лесостепной и почти в 4 раза в степной зоне. При этом сток речного половодья повсеместно снизился в пределах 10–40%. В то же время доля поверхностного стока с площади гидрографической сети возросла соответственно на 5–10%, 25%, в 1.7 раза. Также повсеместно возросла доля стока инфильтрационного происхождения, формирующегося в основном на склонах и плакорах.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ № 18-05-00479.

Acknowledgments. The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No. 18-05-00479.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zingg A. V. Degree and length of land slope as it effects soil loss in runoff // J. of Agric. Engng. 1940. Vol. 26. P. 59-64.
2. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.
3. Львович М. И. Человек и воды. М.: Географгиз, 1963. 568 с.
4. Carson A. M. and Kirkby M. J. Hillslope form and process. Cambridge Univ. Press, 1972. 475 p.
5. Сурмач Г. П. Водная эрозия и борьба с ней. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 253 с.
6. Водогрецкий В. Е. Влияние агролесомелиораций на годовой сток. Методика исследований и расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 184 с.
7. McCool D. K., Foster G. D., Muichier C. K., and Meuer L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation // Trans. Amer. Soc. Agric. Eng. 1989. № 32 (5). P. 1571-1576.
8. Герасименко В. П. Оценка весеннего поверхностного склонового стока с пахотных земель // Почвоведение. 1993. № 5. С. 84-91.
9. Ларионов Г. А. Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
10. Ларионов Г. А., Добровольская Н. Г., Краснов С. Ф., Б. Ю. Лю. Новое уравнение фактора рельефа для статистических моделей эрозии // Почвоведение. 2003. № 10. С. 1239-1247.
11. Liu B. Y., Nearing M. A., and Rissie L. M. Slope gradient effects on soil loss for steep slope // Trans. ASAE. 1994. № 36. P. 1835-1840.
12. Renard K. G., Foster G. R., Weisies G. A., McCool D. K., and Yoder D. C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA ARS Agriculture Handbook Number 703. 1997. 265 p.
13. Коронкевич Н. И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.
14. Долгов С. В., Коронкевич Н. И. Гидрологическая ярусность равнинной территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 7-25.
15. Барабанов А. Т., Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Панов В. И., Петелько А. И. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62-69.
16. Субботин А. И. Сток талых и дождевых вод (по экспериментальным данным). М.: Гидрометеиздат, 1966. 377 с.
17. Высоцкий Г. Н. О гидрологическом и метеорологическом влиянии лесов (Избранные труды). М.: Сельхозгиз, 1960. 435 с.
18. Водные ресурсы России и их использование СПб: ГГИ, 2008. 598 с.
19. Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Рец Е. П., Сафронова Т. И., Бугров А. А., Телегина А. А., Телегина Е. А. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.
20. Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 548 с.
21. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 664 с.

REFERENCES

1. Zingg A. V. Degree and length of land slope as it effects soil loss in runoff. *J. Of Agric. Engng.* 1940. Vol. 26. P. 59-64.
2. Makkaveev N. I. *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne* (River bed and erosion in its basin). M.: AN SSSR (Publ.), 1955. 348 p. (in Russ.)
3. L'vovich M. I. *Chelovek i vody* (Man and water) M.: Geografiz (Publ.), 1963, 568 p. (in Russ.)
4. Carson A. M. and Kirkby M. J. Hillslope form and process. Cambridge Univ. Press, 1972. 475 p.
5. Surmach G. P. *Vodnaya eroziya i bor'ba s nej* (Water erosion and its control). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1976, 253 p. (in Russ.)
6. Vodogreckij V. E. *Vliyanie agrolesomelioracij na godovoj stok. Metodika issledovanij i raschety* (Influence of agroforestry on annual runoff. Methods of research and calculations). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1979. 184 p. (in Russ.)
7. McCool D. K., Foster G. D., Muichier C. K., and Meuer L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.* 1989. No. 32 (5). P. 1571-1576.
8. Gerasimenko V. P. *Ocenka vesenego poverhnostnogo sklonovogo stoka s pahotnyh zemel'* (Estimation of spring surface slope runoff from arable lands). *Pochvovedenie* (Eurasian Soil Science). 1993. No. 5. P. 84-91. (in Russ.)
9. Larionov G. A. *Eroziya i deflyaciya pochv* (Erosion and deflation of soils). M.: Izd-vo MGU (Publ.), 1993, 200 p. (in Russ.)
10. Larionov G. A., Dobrovolskaya N. G., Krasnov S. F., and B.Yu. Liu. *Novoe uravnenie faktora rel'efa dlya statisticheskikh modelej erozii* (New relief factor equation for statistical erosion models). *Pochvovedenie* (Eurasian Soil Science). 2003. No. 10. P. 1239-1247. (in Russ.)
11. Liu B. Y., Nearing M. A., and Rissie L. M. Slope gradient effects on soil loss for steep slope. *Trans. ASAE*. 1994. No. 36. P. 1835-1840.
12. Renard K. G., Foster G. R., Weisies G. A., McCool D. K., and Yoder D. C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA ARS Agriculture Handbook Number 703. 1997. 265 p.
13. Koronkevich N. I. *Vodnyj balans Russkoj ravniny i ego antropogennnye izmeneniya* (Water balance of the Russian plain and its anchropogenic changes). M.: Nauka (Publ.), 1990. 205 p. (in Russ.)
14. Dolgov S. V. and Koronkevich N. I. *Gidrologicheskaya yarusnost' ravninnoj territorii* (Hydrological stratification of the flat territory). *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2010. No. 1. P. 7-25. (in Russ.)
15. Barabanov A. T., Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Panov V. I., and Petelko A. I. *Poverhnostnyj stok i infil'traciya v pochvu talyh vod na pashne v lesostepnoj i stepnoj zonah Vostochno-Evropejskoj ravniny* (Surface runoff and snowmelt infiltration into the soil on arable land in the forest-steppe and steppe zones of the East European Plain). *Pochvovedenie* (Eurasian Soil Science). 2018. No. 1. P. 62-69. (in Russ.)
16. Subbotin A. I. *Stok talyh i dozhdevykh vod (po eksperimental'nym dannym)* (Melt and rainwater runoff (according to experimental data). M.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1966. 377 p. (in Russ.)
17. Vysotsky G. N. O gidrologicheskom i meteorologicheskom vliyaniy lesov (Izbrannye trudy) (On the hydrological and meteorological effects of forests (Selected Works). M.: Selkhozgiz (Publ.), 1960. 435 p. (in Russ.)
18. *Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie* (Water resources of Russia and their use) Spb.: GGI (Publ.), 2008. 598 p. (in Russ.)
19. Dzhamalov R. G., Frolova N. L., Kireeva M. B., Rec E. P., Safronova T. I., Bugrov A. A., Telegina A. A., and Telegina E. A. *Sovremennye resursy podzemnykh i poverhnostnykh vod evropejskoj chasti Rossii: Formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie* (Modern resources of ground and surface water of the European part of Russia: Formation, distribution, use). M.: GEOS (Publ.), 2015. 320 p. (in Russ.)
20. Voskresenskij K. P. *Norma i izmenchivost' godovogo stoka rek Sovetskogo Soyuza* (The rate and variability of the annual flow of the rivers of the Soviet Union. L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1962. 548 p. (in Russ.)
21. Rode A. A. (Osnovy ucheniya o pochvennoj vlage. T. 1). Basics of soil moisture theory. Vol. 1. L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1965. 664 p. (in Russ.)