

ЛАНДШАФТНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СТРУКТУРЫ ВОДНОГО БАЛАНСА И СТОКА И ОЦЕНКИ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК С УГОДИЙ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ И РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

Рассматриваются возможности использования данных водно-балансовых станций для решения вопросов ландшафтной дифференциации речного стока. Приводится результат такой дифференциации для бассейна верхней Волги.

Интегральный характер речного стока в замыкающем створе требует привлечения информации о бассейновых, пространственно организованных, механизмах его формирования. Для бассейнов любых размеров существенна роль различий составляющих водного баланса в отдельных частях территории. Поэтому на первом этапе основной проблемой является выделение однородных участков бассейна, для которых локально учитывается комплекс факторов формирования склонового и подземного стока. Такая дифференциация предпочтительна в рамках ландшафтно-гидрологического (ЛГ) подхода, когда в качестве элементарных единиц стокообразования выступают не водосборы, а геосистемы различного ранга, отображенные на ландшафтных картах. Согласование ландшафтной и геоботанической карт показало (Исаченко, 1991), что они по своему содержанию достаточно близки. Поэтому в ряде случаев возможно задание в качестве расчетных участков частных водосборов, отличающихся по характеру растительности, типам почвогрунтов и уклонам. Предлагается в качестве однородных ландшафтных единиц использовать ареалы сочетаний растительных и почвенных условий на водосборах, которые непосредственно индицируют различные механизмы стокоформирования. Для их бассейновой совокупности, зная структуру ландшафтов различных (в т.ч. неизученных) водосборов, можно вычислить сток в интересующем нас створе путем сложения объемов стока с однородных участков.

Все сложности такого подхода заключаются в том, что массовые данные по стоку однородных участков отсутствуют. Склоновый сток, измеряемый на стоковых и водно-балансовых площадках, охватыва-

ет ограниченный список ландшафтных комплексов (ЛК), а его величины не учитывают подземную составляющую, фиксируемую в русловой сети. Поэтому были единичные попытки (Субботин, 1978; Субботин, Дыгало, 1986; Субботин и др., 1973; Маркус, Нежевенко, 1972) использовать линейную схему формирования бассейнового стока на основе «весового» учета экспериментальных данных, полученных для однородных ЛК. Эти работы в гидрологической литературе развития не получили вследствие свертывания экспериментальных исследований. Остался путь поиска простых модельных решений, использующих и обобщающих наблюдения и ландшафтные разработки прошлых лет.

В качестве аргументов модели (Федоров, 2007) выступают площади бассейнов, занятые однородными ЛК:

$$Q_j = \sum_i q_i f_j ,$$

где j - индекс речного бассейна; Q_j - сток с него, л/с; q_i - модуль стока с i -го ЛК, л/с км²; f_{ij} - площади j -го бассейна, занятые i -м ландшафтным комплексом, км². Из анализа размерности следует требование о линейности системы, так как коэффициенты уравнения при нелинейной аппроксимации физически неинтерпретируемы.

Важным элементом ЛГ-подхода является оценка стока с различных сельхозугодий и нарушенных территорий. При этом традиционно используются данные наблюдений на стоковых площадках (Коронкевич, 1990) в годы с различным увлажнением и состоянием подстилающей поверхности. Установлено, что зависимость коэффициентов весеннего стока от характера угодья заключается в их уменьшении по цепочке «озимь – стерня – многолетние травы – залежь – зябь – лес» в диапазоне 0,8–0,2 (суглинистые почвы), 0,4–0,05 (супесчаные) и 0,2–0,0 (песчаные почвы) (Водный баланс СССР., 1969).

В то же время наблюдается большое различие стоковых характеристик в один и тот же год (сезон) на площадках с однородным типом обработки и состояния их поверхности. Ряд таких случаев обсуждается в данном разделе. Поэтому использование этих данных, как для региональных обобщений, так и для верификации модельных решений, затруднено. Это связано с тем, что при наблюдениях учитывается в основном поверхностная составляющая стока, реализация которой происходит различным путем, в том числе по микроручейной сети. В соответствии со схемой дифференциации склонового стока часть стока верховодки и подземная составляющая, которая может дости-

гать 20–40%, не фиксируется на гидрометрических сооружениях, замыкающих стоковые площадки и экспериментальные водосборы.

При реализации пространственных закономерностей стокоформирования на уровне ЛК и механизмов поступления воды в русловую сеть наблюдается большое разнообразие межгодовых внутрибассейновых комбинаций и сочетаний сельхозугодий, что приводит, наряду с условиями снеготаяния, к различиям гидрографов речного стока даже при прочих равных условиях (начальное увлажнение бассейна и глубина эрозионного вреза малых водосборов). Разница речного и склонового стока объясняется также тем, что до 30% речного стока в весенний период формируется в гидрографической сети. Поэтому при ландшафтной дифференциации водосборов необходимо учитывать долю их площади, занятой пойменными лугами и прилегающими к ним склонами долин.

Для водосборов Велико-Анадольской водно-балансовой станции (Шпак, 1968, лог Пасечный и р. Мокрая Волноваха) отмечен недоучет дренируемого подземного стока на 49 мм на логу с меньшим врезом, но с той же ландшафтной структурой (залесенностью). Подобные эффекты, связанные с несовпадением поверхностного и подземного водосборов, отмечены и для Валдайской гидрологической лаборатории на логу Приусадебном и ручье Архиерейском, врез которого в нижней части достигает 6–8 м. Возможен приток грунтовых вод из лога Лесного в лог Центральный, а для лога Усадьевского – в северо-западную часть водосбора, что связано с широким развитием в флювиогляциальных песках мощного и водообильного водоносного горизонта с близким к поверхности положением уровня грунтовых вод. Во всех упомянутых бассейнах область питания пласта песков выходит за пределы поверхностных водоразделов.

Для Придеснянской водно-балансовой станции также указано (Ещенко, 1966), что подземный водосбор р. Головесня в два раза больше поверхностного. В результате водно-балансовых расчетов Н.Д. Ещенко установил, что приход подземных вод в ее бассейн составляет 36 мм, т.е. половину грунтового стока (71 мм). Для других малых речных бассейнов с площадями от 14 га (Лесной) до 121 га (Петрушино) характерен отток подземных вод, достигающий 24 мм (лог Опытный). Все эти факторы говорят о сложности модельных расчетов стока с ЛК, а данные о бассейновом стоке могут быть исправлены только специалистом, работающим над материалом систематически и только после его водно-балансовой оценки. Иначе данные наблюдений следует забраковать для

большинства малых равнинных водосборов с нечетко выраженными водоразделами, неглубоким залеганием подземных вод и пестрым составом четвертичных отложений. При этом стоковые площадки также могут быть нерепрезентативными, особенно в отношении грунтового стока, величины которого составляют 25–30 мм, тогда как поверхностный сток 54–63 мм (Валдайская гидрологическая лаборатория, 1960 г., водно-балансовые площадки №1 – пашня, и №2 – луг).

Так как прямые наблюдения за стоком с характерных ЛК отсутствуют, данные стоковых площадок все же единственная информация и ее использование - необходимый этап анализа модельных решений.

При анализе крупномасштабных особенностей стокоформирования на водосборах, входящих в состав стоковых станций, учитывается следующее:

- в рамках предположения о линейном характере бассейновой системы необходимо оценить сезонное и многолетнее разнообразие характеристик водоотдачи с различных, наиболее представительных, ландшафтных комплексов территории;

- основное внимание уделяется сельскохозяйственным угодьям и урбанизированным территориям, что связано с различным для них характером снегозадержания и соответственно промерзания почв и весенней инфильтрации, водопотери на микрорельефе и, в конечном итоге, величиной стока. Различия имеются и для условий формирования летне-осеннего стока;

- должны дифференцироваться естественные угодья: леса различного породного состава и местоположения, луга долин и склонов и т.п.

- оцениваются величины стока с различных угодий в годы и сезоны, отличающиеся по условиям тепло- и влагообеспеченности, а реальность модельных решений, на первом этапе анализа, подтверждается материалами наблюдений на стоковых площадках;

- обязателен этап пространственного обобщения полученных стоковых характеристик, анализ контрастности стоковых полей и закономерностей сопряжения и упорядоченности ЛГ - ареалов;

- выявляются различия стока с однотипных угодий, расположенных в различных природных зонах. Последнее связано с широким климатическим диапазоном существования ЛК и разнообразием процессов трансформации осадков в сток.

В этой связи рассмотрим материалы наблюдений на малых речных бассейнах, входящих в системы изучения стока и процессов его

формирования в различных природных условиях по программе работ на ряде водно-балансовых (ВБС) и стоковых (СС) станций. Это водотоки разных размеров (реки, ручьи, лога) с различной степенью дренирования подземных вод, увлажнением и, соответственно, спектром ландшафтных комплексов (угодий).

Материалы наблюдений на основных водно-балансовых и стоковых станциях характерны для следующих природных условий: Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория – центральная часть лесной зоны, дерново-подзолистые супесчаные почвы; Подмосковная ВБС – южная часть лесной зоны, дерново-подзолистые суглинистые почвы; Истринский опорный пункт с близкими к Подмосковной станции природными характеристиками; Нижнедевицкая СС – лесостепная зона, черноземы тяжелосуглинистые; Гидрометеобсерватория (ГМО) «Каменная степь» – граница лесостепной и степной зон, чернозем обыкновенный.

В ряде случаев при описании угодий использовались традиционные названия агросистем (зять, озимые и т.п.), которые по необходимости (отсутствие данных и т.п.) группировались по сходству режима формирования склонового (в основном весеннего) стока. Это агросистемы с уплотненной почвой, включающие в разных сочетаниях и в отдельности многолетние травы, озимые, пастбища, залежь и стерню.

Оценка гидрологических функций ЛК включает следующие этапы:

- описание мозаики угодий на водосборе, характерной для конкретного гидрологического сезона;
- получение модельных решений для величин стока с угодий, отвечающих условию полноты описания бассейнового стока;
- проверка решений путем сравнения рассчитанных и наблюдаемых на стоковых площадках величин стока;
- оценка точности расчетов в многолетнем разрезе, установление диапазонов водоотдачи с территории одного ЛК и их связь со стоком с других ЛК.

В ряде случаев анализируется суточный ход стока с различных угодий, что позволяет раскрыть временные закономерности формирования водоотдачи с контрастных ЛК. Оценки изменений стока при хозяйственной деятельности на водосборах лежат в рамках представлений о гидрологической роли пашни и лесов различного породного состава в различные периоды увлажнения.

В качестве примера приводятся материалы ЛГ-анализа для указанных выше станций.

Подмосковная водно-балансовая станция

Бассейн р. Медвенки, в пределах которого расположена эта станция, находится в подзоне смешанных лесов, развитых на дерново-подзолистых и подзолистых почвах. Очень широко распространены покровные суглинки, в северной части бассейна встречаются надморенные отложения флювиогляциальных песков. Условия стокоформирования также определяются преобладанием в лесах мелколиственных пород и посадок сосны. Еловые и дубовые леса занимают незначительные площади, хотя являются для Нечерноземного центра Русской равнины коренными. Распаханность бассейнов малых рек достигает 80% (Лызлово), площади, занятые населенными пунктами, – 38% (лог Полевой).

Цикл ландшафтно-гидрологических исследований, проведенный А.И. Субботиным и В.С. Дыгало (1991) на водосборах Подмосковной ВБС, является пионерным, но в значительной мере отражает сложности ЛГ-анализа, особенно в связи с заданием ландшафтной структуры водосборов. Для выделенных пяти ландшафтных комплексов – смешанный лес на суглинках (I) и супесях (II), безлесные участки на суглинках (III) и супесях (IV) и долинные луговые комплексы (V) – не учтены такие важные гидрологические элементы, как распаханность и наличие населенных пунктов.

Дополним классификацию ландшафтов А.И. Субботина, введя ландшафтный комплекс «пашня на суглинках» и «населенные пункты», площадь которых достигает на частных водосборах Подмосковной ВБС 80% и 34% соответственно. В табл. 1 приведены решения, которые показывают, что половодье 1962 г. характеризуется близкими слоями стока с полевых и лесных угодий на суглинистых почвах (40–49 мм) и высоким стоком с территорий населенных пунктов, что обусловлено повышенным коэффициентом стока. Это характерно и для других лет, когда коэффициент стока достигает величин даже больше единицы. Единичный паводок летом 1962 г. подтверждает, что сток с урбанизированных территорий в 3–4 раза выше, чем с других, даже нарушенных сельскохозяйственных угодий.

Другой вариант расчетов (табл. 2) проведен для случая, когда безлесные участки на суглинистых почвах (ландшафт III) были дифференцированы на собственно ландшафт III (без учета его распаханности) и населенные пункты (НП).

Таблица 1. Сток за половодье и паводок с угодий Подмосковной ВБС (1962 г.)

Характеристики	Угодья				
	Пашня на суглинках	Луг на суглинках	Лес на суглинках	Лес и луг на супесях	Населенные пункты
Сток за половодье, мм	49,4	47,3	40,0	26,8	162,0
Коэф. стока ($K_{ст}$)	0,47	0,25	0,23	0,125	0,87
Сток за паводок, мм	0,0	4,9	3,8	0,0	16,8
Общий поверхностный сток, мм	0,0	2,4	1,9	0,0	8,4

С ландшафтов на супесчаных почвах поверхностный сток не наблюдается, что подтверждается данными А.И. Субботина и В.С. Дыгало (1991). Для лога Лызлово характерно, кроме наличия залесенных участков (10% площади), почти равное распределение площадей супесчаных и суглинистых почв (порядка 45%). Поэтому наблюдаемые на логу 64 мм являются стоком с участков безлесных суглинистых почв ($124\text{мм} \times 0,47 = 58\text{мм}$) и небольшого (2–3 мм) стока с лесных участков. Сток с гидрографической сети можно оценить в 30 мм.

При оценке стокоформирующей роли различных природных и техногенных комплексов Подмосковной ВБС (табл. 3) в ландшафтной структуре водосборов учтены типы сельскохозяйственных (озимь, язьбь, многолетние травы) и лесных угодий (лиственный лес в основном на супесчаных почвах и типичные хвойно-широколиственные леса на суглинках). Приведены их площади (в %), что позволяет проследить, как формируется сток частных водосборов с учетом слоев и коэффициентов стока с различных по гидрологическим функциям типов подстилающей поверх-

Таблица 2. Другой вариант расчетов для Подмосковной станции

Ландшафты	I	II	III	IV	V	НП
Сток, мм (по А.И. Субботину)	28	0	91	64*	159**	–
Рассчитанный сток, мм	30	4	124	0	30	90

* Принят по логу Лызлово.

** Взят из условия $K_{ст} = 0,9$.

Таблица 3. Площади угодий (%) и сток с них (мм за период половодья) на Подмосковной ВБС в 1975 г.

Водосборы	Угодья							Сток половодья	
	озимые	зять	многолетние травы	луг	Лес		населенные пункты	слой, мм	коэффициент
					лиственный	хвойно-широколиственный			
Медвенка – Лапино	32	1	7	9	0	17	34	55	0,55
Медвенка выше устья Закзы	24,6	1,6	14,8	11	0	26	22	44	0,42
Лызлово	45,6	0	34,4	4	2	8	6	5	0,04
Кулибин	11,2	0	8,8	2	0	71	7	11	0,09
Прогоны	0	15	29	6	42	0	8	16	0,14
Полевой	0	0	56	0	0	0	38	14	0,14
Лесной	0	0	0	0	100	0	0	4	0,04
Слой стока	38	1	5	30	10,7	6,5	128		
Коэффициент стока	0,36	0,010	0,052	0,30	0,010	0,037	1,28		

ности. В период половодья 1975 г. преобладающим был сток с территорий населенных пунктов, что скорее связано с увеличившимся техногенным водоотведением, а не с особенностями стока с территорий с уплотненными почвами, в т.ч. занятых сельхозкультурами. Так сток с луговых ландшафтных комплексов составил 30 мм ($K_{ст}=0,30$), а для озимых – 38 мм.

Учитывая сложившиеся представления и целевую функцию исследований, были проведены расчеты по модели за годы с различными снегозапасами и получены характеристики стока для сельскохозяйственных (озимь, зять, многолетние травы), лесных (лиственные и хвойно-широколиственные) угодий, лугов и территорий населенных пунктов (табл. 4). Следует отметить широкий диапазон слоев и коэффициентов стока ($K_{ст}$) с однотипных угодий в различные годы. Так $K_{ст}$ для озимых меняется от 0,07 до 0,61, для зяби – 0,01–0,70 и многолетних трав – 0,11–0,87. При этом запас воды в снеге лежит в диапазоне 100–200 мм. За рассматриваемый период средние слои и $K_{ст}$ для них в общем близки (60–80 мм и 0,34–0,47). Наиболее контрастны условия стока с лесных и урбанизированных территорий.

Мелколиственные леса, приуроченные к наиболее возвышенным и дренируемым водораздельным участкам, во всех вариантах расчетов дают больший сток, чем хвойно-широколиственные (37 мм и 9 мм соответственно), по местоположению в рельефе занимающие менее возвышенные водоразделы. Межгодовая изменчивость коэффициентов стока лиственных лесов менее значительна (0,11–0,32), чем для полевых угодий. Определяющую роль в формировании речного стока играют урбанизированные территории.

Для озимых и многолетних трав сток половодья (1985 г.) реализуется в первую декаду снеготаяния (табл. 4), а в дальнейшем для них возможны потери стока на пополнение почвенных влагозапасов, что снижает общее поступление воды в русловую сеть в период, когда начинается активная водоотдача с лесных угодий, лугов и заиби.

По нашим данным, весенний сток с сельскохозяйственных и луговых угодий достаточно однороден. Пашни в среднем дают 60–80 мм, а придолинные луга – 60 мм. В ряде случаев отмечается хорошее соответствие расчетных и натурных данных. Во многом это связано с учетом на стоковых площадках (СП) почвенного стока, который в лесных геосистемах составляет до 75% от полного (1975 г.) и превышает поверхностный сток за период снеготаяния.

Таким образом, расчеты для Подмосквонной ВБС дают основания для успешного использования материалов СП для оценки стока с более обширных территорий с аналогичными типами подстилающей поверхности. Возможно, это обстоятельство существенно для лугов и лиственных лесов и менее отчетливо проявилось для территорий, занятых многолетними травами.

В 1985 г. на СП 1 и СП 2 характер формирования стока соответствовал модельной оценке стока с угодий с многолетними травами за первую декаду апреля (табл. 3), а слои стока составили 79 мм (СП 1), 77 мм (СП 2) и 74 мм (расчет). При этом сток с поверхностей с озимыми и травами полностью реализовался в первую декаду, тогда как основная доля стока других угодий сформирована во вторую декаду стокоформирования. Установлено, что сток с территории населенных пунктов – одна из важнейших составляющих бассейнового стока, а его коэффициенты достигают, по нашим расчетам, величин, превышающих единицу (табл. 3). Это скорее связано с увеличившимся водоотведением, а не с особенностями стока с уплотненных поверхностей, причем расчеты прямо указывают, что дополнительные объемы

Таблица 4. Характеристики стока за период половодья с угодий Подмосковной ВБС (в числителе – сток (мм), в знаменателе – и коэффициенты стока)

Годы		Угодья					
		озимь	зять	многолетние травы	луг	Лес	
						лиственный	хвойно- широколист- венный
1978		$\frac{100}{0,61}$	$\frac{17}{0,10}$	$\frac{18}{0,11}$	$\frac{32}{0,20}$	$\frac{17}{0,11}$	$\frac{1,3}{0,01}$
1979		$\frac{103}{0,51}$	$\frac{86}{0,41}$	$\frac{115}{0,73}$	$\frac{61}{0,36}$	$\frac{30}{0,17}$	$\frac{215}{1,38}$
1980		$\frac{68}{0,44}$	$\frac{107}{0,70}$	$\frac{28}{0,22}$	$\frac{41}{0,27}$	$\frac{25}{0,16}$	$\frac{1}{0,01}$
1981		$\frac{37}{0,36}$	$\frac{84}{0,53}$	$\frac{146}{0,87}$	$\frac{54}{0,35}$	$\frac{51}{0,31}$	$\frac{0}{0,00}$
1982		$\frac{11}{0,07}$	$\frac{1,6}{0,01}$	$\frac{108}{0,46}$	$\frac{59}{0,24}$	$\frac{73}{0,32}$	$\frac{16}{0,05}$
1985		$\frac{78}{0,43}$	$\frac{117}{0,64}$	$\frac{75}{0,38}$	$\frac{113}{0,63}$	$\frac{29}{0,15}$	$\frac{16}{0,08}$
среднее		$\frac{66}{0,40}$	$\frac{69}{0,40}$	$\frac{82}{0,47}$	$\frac{60}{0,34}$	$\frac{37}{0,20}$	$\frac{9}{0,04}$
Апрель 1985 г.	I декада	92,0	1,0	74,0	0,6	0,0	21,6
	II декада	0,0	96,0	0,0	25,0	20,0	74,0
	III декада	0,0	56,0	0,0	3,9	6,0	38,0

воды поступают в реку с этих территорий, а не другим путем. В работах А.И. Субботина при описании ландшафтной структуры бассейна р. Медвенке урбанизированные территории учтены не были, что в современных условиях методически неправильно. Можно предположить, что выявленные соответствия косвенно подтверждают оценки водоотдачи с сельскохозяйственных угодий и территорий населенных пунктов, для которых верифицирующая информация отсутствует.

Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория

Территория ВНИГЛ находится в северной части подзоны смешанных лесов, в области холмисто-моренного ландшафта. Коренные юр-

ские плотные глины повсеместно перекрыты ледниковыми валунными суглинками, разделенными песчаными и супесчаными отложениями. Речные бассейны территории различаются в гидрологическом отношении и характером почвенного покрова, зачастую формирующимся на песках. Положительные формы рельефа заняты слабоподзолистыми почвами, пониженные – подзолисто-глеевыми. Широко распространены низинные и верховые болота. Господствующая лесная порода – ель, а на песчаных, хорошо дренированных почвах и верховых болотах – сосна. На низинных болотах преобладает береза и ива. При расчетах была принята дифференциация угодий, учитывающая их природные особенности – лиственный и хвойный леса, кустарники, заболоченные участки с различным покровом, луга и пашни.

В 1960 г. (табл. 5) основной сток малых рек формировался за счет территорий, занятых лиственным (с участием сосны) и заболоченным лесом. Сток с них в период половодья, как и с сельхозугодий, наибольший и достигает 150–180 мм, что составляет 68% (поля) и 44% (лес) от годового. Хвойный лес характеризуется более высокими регулирующими свойствами и в летне-осенний период 1960 г. определяет водность логов Таежный, Еловый и Сосновый. Основными стокорегулирующими являются территории, занятые лиственными лесами, сток с которых в летний период достигает 100 мм. Для полевых водосборов (луга и сельхозземли) основной сток наблюдается весной. Роль верховых болот в формировании летне-осеннего стока не прослеживается. В зимний период можно отметить высокую гидрологическую роль сельхозземель, залесенных низинных болот и хвойных лесов.

На стоковых площадках с луговым покрытием (СП 1, 2, 5, 6, 11–14) в 1960 г. наблюдался широкий диапазон величин слоя весеннего стока: от 64 мм (СП 2) до 109 мм (СП 3). В то же время на водно-балансовой площадке №2 в период 7.IV – 13.V поверхностный сток составил 54 мм, тогда как грунтовый (водоприемник на глубине 1,87 м) – 232 мм. Последнее связано с тем, что был затронут водообильный водоносный горизонт в песчаных отложениях, который дренируется водотоками. Наша оценка (95 мм) соответствует данным СП 3 и в среднем по территории распространения лугов может быть признана достоверной. Поверхностный весенний сток с уплотненных поверхностей (озимь) составлял 84 мм (СП 8) – 136 мм (СП 3), что ниже наших оценок для многолетних трав (185 мм), но на водно-балансовой площадке №1 (пашня) зафиксирован грунтовый сток 201 мм (глуби-

Таблица 5. Сток с угодий Валдайской НИГЛ (1960 г.)

Характеристики	Угодья						
	луг	лиственный лес	хвойный лес	заболоченный лес и кустарники	болото	огороды	многолетние травы
Годовой сток, мм	130	370	125	340	80	230	280
$K_{ст}$	0,26	0,66	0,19	0,59	0,14	0,45	0,57
Летне-осенний сток, мм	26	104	29	115	0	12	22
$K_{ст}$	0,06	30	0,08	0,37	0,00	0,03	0,07
Сток за половодье, мм	95	140	60	150	50	155	185
$K_{ст}$	0,50	0,72	0,29	0,75	0,27	0,81	0,98

на – 0,65 м). Эти факты говорят, что в условиях ВНИГЛ подземная составляющая стока является определяющей в формировании половодья малых водотоков, что косвенно отразилось в оценках гидрологических характеристик для лесных и полевых угодий. Значительную долю (от 60 до 90%) подземного стока для начальной фазы весеннего половодья и дождевых паводков подтверждают М.Л. Марков и др. (2004).

В 1961 г. эти закономерности в общем подтвердились (табл. 5). Наибольший годовой и весенний сток наблюдался с пашни, занятой многолетними травами и огородными культурами, и лесных угодий (разделение на лиственный и хвойный лес не проведено). При общем более низком стоке, чем с плакорных угодий (как и в 1960 г.), заболоченные леса и кустарники превышают по водоотдаче болота и сырые луга, что подтверждает плохую дренированность последних. Рассчитанный сток с лесных угодий (табл. 6) хорошо соответствует наблюдениям на водно-балансовой площадке №4 в январе – августе, после чего ее данные более близки к оценкам для заболоченного леса. Высокий сток с территории заболоченных лесов говорит о реальной возможности их дренирования во все фазы стока, что приближает их гидрологический режим к лиственным лесам.

Отметим, что имеются значительные расхождения модельных оценок стока за конкретные месяцы и прямых наблюдений на водно-

Таблица 6. Сезонный сток (мм) с ландшафтных комплексов Валдайской НИГЛ (1961 г.)

Месяц	ЛК							
	Пашня	Луг	Лес	Заболоченные участки				ВБП 4, лес
				Кустарник	Луг	Лес	Болото	
I	21,0	9,8	12,5	2,3	0,7	5,1	1,4	9,6
II	7,1	3,4	5,5	0,9	0,3	2,2	0,5	0,6
III	83,6	37,5	16,2	7,1	2,6	7,4	5,6	20,0
IV	143,0	68,0	92,0	16,0	5,1	37,4	9,3	119,0
V	48,0	23,6	43,7	6,1	1,8	17,4	3,1	47,4
VI	5,5	2,5	1,1	0,5	0,2	0,5	0,4	1,1
VII	4,9	3,0	13,7	1,2	0,3	5,3	0,3	8,2
VIII	42,0	21,0	45,0	5,8	1,7	17,9	2,7	54,0
IX	20,3	9,8	14,2	2,3	0,7	5,7	1,3	5,0
X	5,3	2,6	4,0	0,6	0,2	1,6	0,3	0,2
XI	13,2	6,2	6,3	1,3	0,5	2,6	0,9	1,8
XII	13,8	6,5	8,7	1,5	0,5	3,5	0,9	4,0
Среднегодовой сток	403,0	192,0	264,0	45,0	14,5	107,0	26,0	271,0

балансовых площадках (ВБП). Особенно это проявилось для ВБП 2 (луг) и ВБП 1 (пашня), для которых сток за апрель 1961 г. достигает 300 мм, что в данный год совершенно нереально, т.к. максимальные снегозапасы были порядка 100 мм, а жидкие осадки – 50 мм.

Были проведены водно-балансовые расчеты по материалам наблюдений на ВБ площадках (табл. 7). При этом определены величины расчетной водоотдачи, которые должны формироваться при реальных соотношениях приходной и расходной частей водного баланса угодий. Во всех случаях, при учете изменений влагозапасов в 1 м почвенного слоя, они близки к нашим модельным оценкам.

Для хвойного леса (ВБП 4) все варианты гидрологических оценок (расчетная водоотдача, наблюдаемый сток и модельные решения для периода март–июнь 1961 г.) близки (табл. 7), что говорит о верности предпосылок, заставивших усомниться в данных прямых наблюдений, и подтверждает достоверность модельных расчетов. Распространять данные СП и ВБП Валдайской НИГЛ на территорию подзоны смешанных лесов без учета подземной составляющей речного стока, аномально большой вследствие распространения песчаных отложений и межбассейновых перетоков, следует с большой осторожностью.

**Таблица 7. Водный баланс угодий Валдайской НИГЛ
(по материалам водно-балансовых площадок, 1961 г., мм)**

Характеристики		Угодья		
		луг, ВБП 2	хвойный лес, ВБП 4	пашня, ВБП 1
Осадки	март	52	84	66
	апрель	49	51	51
	май	91	97	93
	июнь	74	62	54
Изменение снегозапасов	март	9	29	–12
	апрель	–102	–102	–98
	май	–	–	–
	июнь	–	–	–
Испарение	март	15	21	13
	апрель	68	58	55
	май	81	85	85
	июнь	84	116	52
Изменение запасов в почвогрунтах	март	–8	10	–12
	апрель	–12	–10	–32
	май	–14	–43	–37
	июнь	–12	–58	–6
Расчетная водоотдача	март	36	24	77
	апрель	95	106	126
	май	24	55	45
	июнь	2	4	8
Модельные решения	март	38	16	84
	апрель	68	92	143
	май	24	44	48
	июнь	2,5	1	6
Наблюденный сток	март	43	20	35
	апрель	260	119	296
	май	111	47	60
	июнь	27	1	9

Нижедевицкая водно-балансовая станция

Станция расположена в южной части лесостепной зоны в верхней части водосбора р. Девичы. Рельеф – волнистая равнина, изрезанная глубокими долинами водотоков, оврагами и балками. Отложения представлены песчаными ледниковыми глинами и суглинками. Подстилающая ледниковые отложения меловая толща сильно закарстована.

При анализе гидрологических различий стока водосборов рассмотрены варианты описания их ландшафтной структуры, учитывающие как положение угодий на элементах рельефа, так и типы землепользования на пахотных землях. Последнее предпочтительно, т.к. позволяет выделить антропогенную составляющую при изменениях речного стока, но, с другой стороны, в условиях значительной расчлененности рельефа различия стока с открытых крутых склонов и залесенных плакоров, занимающих значительные площади, вносит существенную составляющую в вариации внутригодового и многолетнего стока. Почвы территории Нижедевицкой ВБС в основном соответствуют типам рельефа, и их гидрологическая роль этим косвенно учитывается.

Для территории характерны контрасты стока логов. Различия стока логов Медвежий и Долгий (51 мм и 21 мм соответственно) с примерно одинаковой лесистостью объясняется тем, что они имеют разную площадь участков с высокой инфильтрационной способностью грунтов (Шпак, 1968), которые в принятой нами системе индицирующих стоков ландшафтов не учитываются. В конкретные годы резкие различия стока с сельхозугодий (зябь и озимь) позволяют удовлетворительно описать разнообразие стоковых характеристик полевых водосборов (Татьянин, Барский, Барсук и др.).

Ландшафтно-гидрологический анализ изменчивости стока с территории Нижедевицкой ВБС показал следующее. В период 1961–1966 гг. максимальной водоотдачей характеризуются луговые комплексы (табл. 8), которые в основном приурочены к крутым задернованным склонам. В отдельные годы сток с них достигает 164 мм (1963 г.), а в среднем составляет 80 мм. Коэффициенты стока лежат в диапазоне 0,33–0,98 (в среднем – 0,59).

Сток с сельхозземель значительно варьирует в зависимости от увлажнения, достигая для озимых 123 мм и для зяби 104 мм (1963 г.). В среднем водоотдача в период половодья с озимых выше, чем с зяби.

**Таблица 8. Слой (мм) и коэффициенты стока половодья
с различных угодий Нижнедевицкой ВБС и стоковых площадок***

Годы	Угодья							
	пашня				лес		луг	
	озимые		заябь					
1961	$\frac{18,4}{0,26}$	16,7 СП 12	$\frac{7,5}{0,09}$	12,9 СП 9	$\frac{17}{0,15}$		$\frac{22}{0,34}$	29 СП 16
1962	$\frac{17}{0,17}$	11 СП 14	$\frac{8,7}{0,09}$	28 СП 15	$\frac{2}{0}$		$\frac{51}{0,67}$	90 СП 16
1963	$\frac{123}{0,94}$	142 СП 11,15	$\frac{104}{0,65}$	105 СП 10	$\frac{92}{0,42}$		$\frac{164}{0,98}$	171 СП 16
1964	$\frac{94,2}{0,70}$	102 СП 10	$\frac{32}{0,21}$	90 СП 9	$\frac{22,1}{0,12}$	14 СП 24	$\frac{133}{0,76}$	180 СП 16
1965	$\frac{50,6}{0,50}$	56,6 СП 11	$\frac{29,9}{0,27}$	52 СП 9	—	0 СП 24	$\frac{53}{0,33}$	62 СП 13
1966	$\frac{5,4}{0,07}$		$\frac{0}{0}$	0,9 СП 21	$\frac{8}{0,05}$	24 СП 24	$\frac{60}{0,45}$	56 СП 15
Среднее	$\frac{51}{0,44}$	66	$\frac{30}{0,22}$	48	$\frac{24}{0,12}$		$\frac{80}{0,59}$	98

* В числителе – рассчитанные слои стока; в знаменателе – $K_{ст}$. Справа показаны наблюдаемые на стоковых площадках (СП и их номер) слои стока в конкретном году.

Наблюдается в общем хорошее соответствие рассчитанных величин и стока, зафиксированного на СП с аналогичными типами подстилающей поверхности (табл. 7). Это отчетливо видно в экстремальный по стоку 1963 г. и в аномальный 1961 г., когда до середины января почва была талая.

Наиболее надежно верифицируются расчеты водоотдачи с озимых и лугов; несколько хуже для зяби (1964 и 1965 гг.) и леса (1966 г.). Даже для стоковых площадок с одинаковым типом подстилающей поверхности или характером ее обработки слои и коэффициенты весеннего стока могут различаться на порядок. Например, в 1966 г. на СП 14 и СП 23 с зяблевой пахотой коэффициенты стока составили 0,76 и 0,04 соответственно. На стоковых площадках 1–4 (пар) диапазон слоев стока был 16,4–115 мм (1973 г.), 5,6–77 мм (1972 г.) и только в 1971 г. составил 127–167 мм, что более приемлемо. Объяснить этот факт различиями уклонов склонов или механического состава почв не представляется возможным. Например, в 1966 г. пашня в основном была под зябью, а озимые весной скошены. Трудно ожидать, что при слоях бассейнового стока 4,6–11,3 мм (исключение лог

Таблица 9. Слой и коэффициенты весеннего стока с угодий водосборов в Каменной степи

Год	Характеристика	Угодья			
		зябь	озимь, стерня, залежь	травы	лесные полосы
1968	h, мм	27,0	100	0,0	–53,0
	K _{ст}	0,250	0,68	0,000	–
1975	h, мм	1,5	18,2	7,4	1,2
	K _{ст}	0,016	0,178	0,073	0,010
1988	h, мм	37,0	51,0	20,0	–73,0
	K _{ст}	0,400	0,560	0,29	–

Татьянин – 56 мм), водоотдача с поверхностей, занимающих на водосборах до 65% площади (лог Ивкин, зябь), может достигать величин 56–77 мм (СП 13–15, зябь и озимая пшеница). Такие количества воды просто были обязаны определить бассейновый сток в 30–40 мм.

Наши расчеты подтверждают возможность описания гидрологических различий малых водосборов на основе их ландшафтной дифференциации. Так, аномально высокий сток на л. Татьянин формируется на луговых склоновых поверхностях, которые в 1961–1965 гг. характеризуются максимальной водоотдачей (табл. 8), а в 1963 г. K_{ст} достигал 0,98.

Каменно-степная Гидрометобсерватория

Территория Каменной степи лежит на границе двух географических подзон недостаточного увлажнения – типичной и южной лесостепной. Характерен умеренно расчлененный тип местности с близким залеганием грунтовых вод.

Преобладают обыкновенные черноземы на плато и водоразделах и пологих склонах. Почвообразующая порода – лессовидная карбонатная глина.

В Каменной степи ярко выражена контрастность весеннего стока, особенно для балок, находящихся в оазисе лесных полос. В среднем сток степных балок на 7 мм выше стока облесенных (Мишон, 1988). Расчеты показали, что весенний сток с зяби ниже, чем с полей с уплотненной почвой (табл. 9). Особенно ярко это было выражено в 1968 г., когда в период 23–27 марта с них поступило 70 мм, а с полей с зябью – 10 мм при одинаковых снегозапасах.

Таблица 10. Водоотдача с территории стоковых площадок в Каменной степи (1968 г.)

СП	Площадь угодий, %			Слой стока, мм
	лес	зябь	коси́мая залежь	
1	9,0	91,0	0,0	32,1
2	0,0	100,0	0,0	35,2
7	0,0	0,0	100,0	80,5
8	16,7	0,0	83,3	57,2
10	10,0	90,0	0,0	30,1
Н, мм	–45	38	79	R=0,99

Расчеты стока половодья в общем подтверждаются наблюдениями на стоковых площадках: 27 мм и 35 мм на СП2 с зябью; 100 мм и 80 мм на СП 7 с косимой залежью. На лесной СП 6 сток на зафиксирован.

В табл. 9 для лесных полос указаны отрицательные величины стока. Этот парадокс объясняется тем, что гидрологическая роль леса в степных и лесостепных районах заключается в задержании влаги и более полном ее использовании для пополнения почвенных влагозапасов. Поэтому «отрицательный сток», по сути, необходимая составляющая водного баланса водосборов, а модель косвенно это учитывает.

В 1988 г. на стоковых площадках (СП 1–3) с зябью стока не наблюдалось, тогда как в решениях он значителен (37 мм). При высоких запасах воды в снеге (до 100 мм) и закономерном ходе водоотдачи с пахотных земель этот факт достаточно противоречив. В начальный период снеготаяния (18–19 марта) 1988 г. максимумы стока реализовались на землях, занятых озимыми и многолетними травами (15 мм и 11 мм соответственно). Для последних суточные слои стока в дальнейшем лежали в диапазоне 0,1–0,6 мм с локальным максимумом 23–25 марта (до 3 мм), а для озимых наблюдалось, после спада 20–21 марта, постепенное нарастание водоотдачи с максимумом 27 марта. Для зяби сток начался позже, достигая хорошо выраженного максимума 25–26 марта.

Весной 1988 г. лесные полосы аккумулировали на своей площади (0,66 км²) 73 мм влаги (табл. 9), что на площадь балок 6,2 км² составляет около 7 мм. Эта величина пополнения влагозапасов почвы соответствует разнице стока степных и облесенных балок (Мишон, 1988, с. 120), что косвенно подтверждает наши расчеты. В 1968 г. в расчете также получены потери стока для лесных полос. Суточный ход стока позволяет выявить структуру потерь: 23–27. III аккумулировано

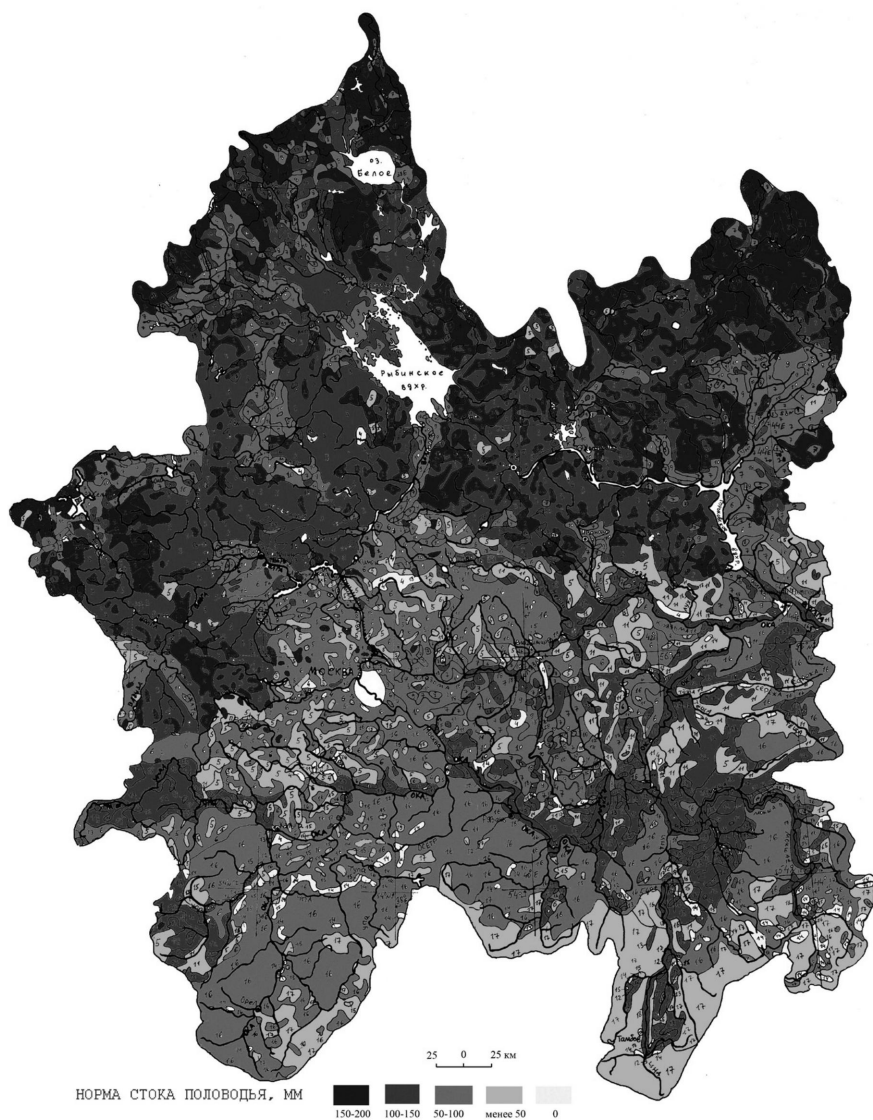


Рис. Средний многолетний сток половодья в основных ландшафтных комплексах бассейнов рек Оки и Верхней Волги, мм

42,5 мм; 28.III – 3.IV наблюдался сток 16,5 мм, а в период 4–10 апреля вновь потери 27 мм, что в сумме дает 53 мм задержанной влаги.

Анализ данных по стоковым площадкам (табл. 10) подтверждает факт накопления влаги, поступающей с полевых участков, в пределах лесополос. Расчеты по независимым материалам (сток балок в табл. 8 и сток с СП) показали сходство полученных оценок стока с различных угодий – для лесных полос 53 и 45 мм (потери), с зяби 27 и 38 мм и полей с уплотненной почвой 100 и 79 мм соответственно. Это также говорит о высокой разрешающей способности линейных моделей водосбора для описания гидрологических контрастов в различных природных условиях формирования стока.

Аналогичные расчеты и их обсуждение проведены для ряда других водно-балансовых станций в различных природных зонах ЕТР. Они подтвердили перспективность ЛГ-подхода при оценке гидрологических свойств и информативности ландшафтной структуры территории в естественном и нарушенном состояниях и дали возможность перейти к ландшафтной индикации речного стока. Более подробно модель такой индикации изложена в работе В.Н. Федорова (2007), а результаты на примере бассейнов верхней Волги и Оки представлены на рисунке. Отметим лишь, что индикационный подход использован для выявления ландшафтной структуры бассейнов через состав растительного покрова (процентное соотношение площадей, занятых основными растительными сообществами). Основные типы растительности, представленные на территории исследуемых водосборов, объединены в 16 групп на основе сходства гидрологических особенностей. Среди них еловые южно-таежные леса, широколиственно-еловые, сосновые, широколиственно-сосновые леса, замещающие их восстановительные серии (березово-осиновые), сельскохозяйственные угодья на месте сведенных лесов, а также степные и болотные сообщества. Использована карта растительности масштаба 1:2 500 000.

Рассмотрим данные, представленные на рисунке. Высокий и достаточно стабильный сток за период половодья в диапазоне 150–200 мм формирует ландшафты с коренными сообществами южно-таежных еловых лесов. Сравнимые величины стока, однако менее стабильного, дают болотные сообщества. Слой стока половодья 50–100 мм характеризуются восстановительные серии и сельскохозяйственные земли на месте широколиственно-еловых лесов. Сток половодья менее 50 мм дают степные ландшафты,

широколиственно-сосновые растительные сообщества, восстановительные серии на месте широколиственно-еловых сообществ.

В экстремальный по климатическим характеристикам 1972 г. слой стока половодья с заболоченных и остепненных территорий составил менее 50 мм, в то время как южно-таежные еловые и сосновые леса формировали сток 180–190 мм.

Еще раз подчеркнем, что задача исследований – показать принципиальную возможность получения ранее неизвестной информации о внутрибассейновых особенностях формирования речного стока, выявить при этом гидрологическую роль различных ландшафтных комплексов. Поэтому объяснение полученных решений проведено по «укрупненным» показателям и требуется более тщательный анализ с привлечением данных о конкретных условиях тепло- и влагообеспеченности фаз стока, структурных особенностях строения толщи почвогрунтов, условий дренирования и т.п. Необходимо совершенствование методов описания ландшафтной структуры бассейнов на локальном уровне по единому для природной зоны набору типов подстилающей поверхности и их состояний. Отметим, что традиционное в гидрологии описание полевых угодий в общем соответствует сложности представлений о процессах трансформации влаги в бассейновых системах.

Изменение стока, связанное с хозяйственной деятельностью на водосборах, можно оценить для конкретных, ежегодно меняющихся территориальных сочетаний типов землепользования и условий влагообеспеченности. Зная величины стока с ненарушенных территорий и пахотных земель на их месте, можно восстановить вероятную водность водотоков, соответствующую ландшафтно-гидрологической организации, оптимальной для зональных условий стокоформирования.

Литература

1. Водный баланс СССР и его преобразование. М.: Наука, 1969. 338 с.
2. *Ещенко Н.Д.* Расчет водного баланса малых водосборов при глубоком залегании грунтовых вод // Материалы семинара по расчетам водного баланса речных бассейнов. Валдай, 1966. С. 202–211.
3. *Исаченко А.Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 365 с.
4. *Коронкевич Н.И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.

5. Марков М.Л., Завилейский С.В., Гуревич Е.В., Марунич С.В. Пространственная динамика водообмена рек и подземных водоносных горизонтов: Тез. докл. VI гидрол. съезда, секция 5, СПб, 2004. С. 102.
6. Маркус Я.А., Нежевенко В.Л. Ландшафтно-гидрологическая карта бассейна ручья Изнань // Ландшафтный сборник. М.: Изд-во МГУ, 1972. С. 207–216.
7. Мишон В.М. Снежные ресурсы и местный сток. Воронеж: Изд. ВГУ, 1988. 192с.
8. Субботин А.И. Структура половодья и территориальные прогнозы весеннего стока рек в Нечерноземной зоне Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 98 с.
9. Субботин А.И., Дыгало В.С. Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне реки Москвы // Гидрологические исследования ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1986. С. 30–38.
10. Субботин А.И., Дыгало В.С. Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне реки Москвы. М.: Гидрометеиздат, 1991. 264 с.
11. Субботин А.И., Змиева Е.С., Нежевенко В.Л., Мамай И.И. Ландшафтно-гидрологический принцип изучения стока // Ландшафтный сборник. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 175–189.
12. Федоров В.Н. Ландшафтная индикация формирования речного стока. Иркутск – М.: Изд-во Ин-та геогр. им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. 175 с.
13. Шнак И.С. Влияние леса на водный баланс водосборов. Киев: Наук. Думка, 1968. 284 с.

V. N. Fedorov, I.I. Terentev

**THE LANDSCAPE-HYDROLOGICAL APPROACH IN THE
RESEARCH OF THE WATER BALANCE STRUCTURE
AND THE RIVER RUNOFF AND IN ESTIMATION OF ITS
CHARACTERISTICS FROM SMALL WATERSHED GROUNDS
AND RIVER BASINS**

Possibilities to use the data from waterbalance stations for the decision of landscape river flow differentiation problems are considered. The result of such differentiation for the Verkhnaya Volga basin is shown.