

© Коллектив авторов, 2012

УДК 556.53

*Ю.М. Нестеренко, И.И. Бондаренко, М.Ю. Нестеренко, В.В. Влацкий,
М.В. Захлевная, И.Х. Мартиросян, Т.Ю. Сумцова*

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТНОГО СКЛОНОВОГО ВОДНОГО СТОКА

Отдел геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН, Оренбург, Россия

Цель. Представить методику разработки математической модели формирования поверхностного склонового стока, основанной на балансовом уравнении и алгоритм расчета склонового стока.

Методы. Значения статей водного баланса определяются как функции солнечной радиации или задаются по данным гидрометслужбы. Значения коэффициентов фильтрации определяются на основе полевых и лабораторных измерений.

Результаты. Предложена методика разработки математической модели поверхностного склонового стока и алгоритм расчета его интенсивности.

Заключение. Алгоритм позволяет проводить параметрическое моделирование процесса поверхностного стока.

Ключевые слова: гидрология, поверхностный сток, склоновый сток, уравнение водного баланса, математическая модель, алгоритм.

*Yu.M. Nesterenko, I.I. Bondarenko, M.Yu. Nesterenko, V.V. Vlatsky, M.V. Zakhlevny,
I.H. Martirosyan, T.Yu. Sumtsova*

TECHNIQUE OF DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF THE SURFACE SLOPE RUNOFF.

Department of Geoecology of Orenburg Scientific Centre UrB RAS, Orenburg, Russia

Objective. Present the methodology of development of mathematical models for the formation of the surface slope runoff, based on the balance equation and algorithm slope runoff.

Methods. Implications of the articles of the water balance is defined as a function of solar radiation or set according to the Hydrometeorological Service. The values of filter coefficients are determined on the basis of field and laboratory measurements.

Results. The technique of developing a mathematical model of the surface slope runoff and algorithm of its intensity

Conclusion. The algorithm allows the parametric modeling of the process of surface runoff.

Key words: hydrology, surface runoff, slope runoff, the water balance equation, the mathematical model, algorithm.

Введение.

Важнейшей задачей гидрологии является расчёт поверхностного водного стока с водосбора. Величина стока зависит от атмосферных осадков и интенсивности снеготаяния, скорости впитывания и коэффициентов фильтрации почво–грунтов, степени насыщенности влагой приповерхностной зоны почво–грунтов при переходе от осени к зиме, рельефа местности, экспозиции склонов, наличия лесозащитных полос, режима испарения на рассматриваемой территории. Учет многообразия факторов, влияющих на поверхностный сток, экспоненциально увеличивает сложность решения задачи [1, 2].

Система нормативных документов СП 33-101-2003 [3] предлагает методику расчета характеристик поверхностного стока на вероятностной основе по 25-40 – летним рядам наблюдений за ним. Достаточно правдоподобные прогнозы основаны на репрезентативном наборе гидрологических рядов со стабильными природными условиями формирования стока на водосборе. Поэтому статистический метод гидрологических расчетов по данным наблюдений на сети гидрологических станций может быть использован лишь для территории с естественной растительностью, не измененной антропогенной деятельностью или для территорий со стабильной хозяйственной деятельностью на водосборе.

Усиливающееся воздействие человека на состояние большинства водосборов вододефицитных территорий, к которым принадлежит и территория Южного Урала, относительно быстрая смена направлений сельскохозяйственного их использования (распашка, залужение, изменение способов обработки почв, создание лесных полос, проведение комплекса мероприятий по накоплению влаги и снега на полях и др.) значительно изменяют стокообразующие факторы на водосборах рек. Поэтому, рассчитывая элементы поверхностного стока в современных природных и динамичных социально-экономических условиях, необходимо учитывать взаимодействия природных факторов, в той или иной мере участвующих в его формировании, и совокупности техногенных факторов, изменяющих его. Соответственно изменяются речной сток и коэффициент стока в зависимости от уровня антропогенной деятельности на водосборе.

Нами предложена модель расчета поверхностного водостока, основанная на фундаментальных физических законах образования поверхностного стока, дополненных измерениями в полевых и лабораторных условиях динамики ско-

рости впитывания влаги в почво-грунты и коэффициента фильтрации, дефицита влажности воздуха на исследуемой территории [4]. Такой синтез теоретического моделирования и практического измерения гидрологических и метеорологических параметров в полевых и лабораторных условиях позволяет настроить математическую модель на фактическое определение статей водного баланса поверхностного талого стока.

Для проверки качества модели путем сравнения с результатами измерений в поле принят склон единичной ширины, длиной 100 единиц (например, метров, километров и пр.) с уклоном $1^\circ - 3^\circ$, занятый различными угодьями (целина, пашня, лесополоса и т.п.). Каждое угодье в плане задается прямоугольником длиной L в диапазоне от 1 до 100 единиц. Для каждого вида угодья задаются приходные и расходные статьи водного баланса и его доля на склоне. Требуется рассчитать величину стока в замыкающем створе склона с учетом вида угодий и рельефа поверхности. Талая вода расходуется на впитывание в почву, испарение и поверхностный сток.

Математическая модель основана на системе балансовых уравнений:

$$U_{\text{пр}} + A_3 + A_{\text{в}} = E_{\text{исп}} + \Phi_{\text{ин}} + U_{\text{ст}}, \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{ин}} = \Delta M_{\text{ас}} + \Phi_{\text{ас}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{пр}}$ – приток на рассматриваемую площадку с вышележащей;

$A_3, A_{\text{в}}$ – зимние (весенние) осадки на угодье;

$E_{\text{исп}}$ – суммарное испарение с угодья (испарение, испаряемость, транспирация);

$\Phi_{\text{ин}}$ – инфильтрация с поверхности угодья в почво - грунты;

$\Delta M_{\text{ас}}$ – изменение запасов влаги в зоне активного водообмена;

$\Phi_{\text{ас}}$ - фильтрация влаги за пределы зоны активного водообмена (питание подземных вод);

$U_{\text{ст}}$ – поверхностный сток с рассматриваемой площадки.

Рассмотрим склон на водосборе, включающий водораздел. Тогда

$$U_{\text{пр}} = 0 \text{ и } U_{\text{ст}} = A_3 + A_{\text{в}} - E_{\text{исп}} - \Phi_{\text{ин}} \quad (3)$$

В частности, если вся впитавшаяся в почву влага идет только на увлажнение корнеобитаемого слоя, то уравнение (3) еще более упрощается:

$$U_{\text{пр}} = 0 \text{ и } U_{\text{ст}} = A_3 + A_{\text{в}} - E_{\text{исп}} - \Delta M_{\text{ас}} \quad (4)$$

Рассмотрим алгоритмы моделирования расчета приходных и расходных статей водного баланса.

Моделирование и алгоритм расчет поступления талой воды и осадков во время снеготаяния.

Скорость снеготаяния определяется в основном тепловыми ресурсами (солнечной радиацией и температурой воздуха).

Уравнение теплового баланса для рассматриваемого участка поверхности имеет вид:

$$R = L + B + V, \quad (5)$$

где R – радиационный баланс, т.е. количество солнечной энергии за вычетом отраженной радиации, поступающей на рассматриваемую территорию;

L – затраты тепла на таяние снега и испарение воды;

B – энергия турбулентного теплообмена между испаряющей поверхностью и атмосферой;

V – теплообмен между испаряющей поверхностью и подстилающей поверхностью.

Детальное отслеживание зависимости слоя талой воды от количества поступившей радиации требует учета изменения множества природных параметров и дорогостоящего инструментального мониторинга этих параметров. Поэтому мы в своей модели опираемся на усредненные показатели, которые дают практически адекватные результаты, позволяющие изучать процесс снеготаяния. В период наступившего снеготаяния интенсивность снеготаяния зависит, прежде всего, от элемента теплового баланса LN , а жидкие атмосферные осадки в период снеготаяния являются ускоряющим фактором.

Среднесуточные затраты тепла на снеготаяние и сопутствующее ему испарение мало зависят от широты местности.

По исследованиям Ю.М. Нестеренко [4] они изменяются от 0,16 кал/(см²·мин) на 50° с.ш. до 0,11 кал/(см²·мин) на 70° с.ш. при суммарном потоке солнечной энергии 0,5 и 0,38 кал/(см²·мин) соответственно. Поэтому актинометрические данные по пгт. Чебеньки Оренбургской области и на Ершовском опытном участке Саратовского Заволжья вполне репрезентативны для Покровского опытного участка Оренбургского района Оренбургской области.

В таблице 1 представлены результаты исследования радиационного баланса и средней скорости снеготаяния по данным пгт. Чебеньки. В табл. 2 представлены аналогичные данные на Ершовском опытном участке в Саратовской области, расположенном в близких климатических условиях.

Сравнение данных табл. 1 и 2 указывает на то, что в Саратовском Заволжье в среднем несколько выше радиационный баланс и, соответственно, слой талой воды поверхностного стока по сравнению пгт. Чебеньки Оренбургской области. Так и должно быть вследствие широтной зональности этих территорий и соответствующего возрастания периода инсоляции в Саратовском Заволжье.

Таблица 1. Средний радиационный баланс деятельной поверхности кал/(см²·мин) в пгт. Чебеньках Оренбургской области в апреле 1962–1968 гг. во время инсоляции

Годы наблюдения	Радиационный баланс кал/(см ² ·мин)	Слой талой воды (мм/сутки)
1962	0,190	23,4
1963	0,156	19,2
1964	0,098	12,1
1965	0,145	17,8
1966	0,195	24,0
1967	0,185	22,8
1968	0,161	19,8
Средние значения	0,161	19,9

Таблица 2. Средний радиационный баланс и средняя скорость снеготаяния на Ершовском опытном участке в апреле 1960 - 1965 гг. во время инсоляции

Годы наблюдения	Радиационный баланс кал/(см ² ·мин)	Слой талой воды (мм/сутки)
1960	0,193	23,8
1961	0,192	23,7
1962	0,217	26,78
1963	0,168	20,62
1964	0,144	17,7
1965	0,194	23,93
Средние значения	0,185	22,78

Наблюдения за режимом радиации на исследуемой территории позволяют рассчитать скорость образования талой воды в снеге A_3 во время таяния снега. Расчет слоя талой воды в снеге дается эмпирической формулой:

$$A_3 = K_T * L, \tag{6}$$

где A_3 – запас воды в снеге, мм;

L – поток солнечной радиации, поступивший на дневную поверхность, кал/(см²*мин);

K_T – калибровочный коэффициент.

В общем случае при наличии нескольких значений актинометрических наблюдений в сутки и учетом многолетних наблюдений расчет слоя талой воды в снеге проводится методом средневзвешенной средней.

Моделирование и расчет инфильтрации талой воды в почву во время снеготаяния.

Расчет впитавшейся воды ведется по формуле:

$$F = f * t , \tag{7}$$

где F – слой впитавшейся воды в почво-грунты;

t – расчетное время;

f – коэффициент (ин-)фильтрации или интенсивность впитывания талых вод в почво-грунты. Определение многопараметрической функции $f(t)$ представляет сложную гидрологическую задачу [5]. Инфильтрация талых вод определяется изменяющимися во время таяния снега водно-физическими свойствами почв, их влажностью и температурой [6, 7, 8]. Эти зависимости усложняются многими другими факторами: обработкой почв, их составом, растительным покровом и погодными условиями периода таяния снега. Факторы, определяющие соотношение процессов таяния снега и инфильтрации, имеют зональный характер и в комплексе обуславливают принципиальные различия в балансе талых вод. В лесостепной и степной зонах Южного Урала и Поволжья при глубоком залегании подземных вод и незначительной увлажненности зоны аэрации ведущими, определяющими соотношение поверхностного (паводкового) стока талых вод и их инфильтрации, становятся состояние поверхностного слоя почво-грунта, его влажность, температура.

Данные, полученные в наших исследованиях инфильтрации талых вод в мерзлые суглинистые почвы, показали, что лишь при температуре -3°C и менее и влажности близкой к наименьшей влагоемкости (НВ) скорость инфильтрации становится меньше возможной интенсивности снеготаяния и начинается формирование поверхностного стока.

Результаты измерений скорости впитывания и коэффициента фильтрации талых вод в мерзлых суглинистых почвах представлены в таблице 3.

Таблица 3. Скорость впитывания талых вод в мерзлые суглинистые южные черноземы Южного Предуралья на различных угодьях в зависимости от их влажности и температуры, мм/мин

Угодье	Замораживание								Коэффициент фильтрации
	Естественная влажность				Наименьшая влагоемкость				
	Исходная влажность % от массы	Температура почвы, °С			Исходная влажность % от массы	Температура почвы, °С			
		0	-5	-10		0	-5	-10	
Зябрь	10	1.2	0.4	0.06	30	1.2	0.02	0.004	1.7
Лесополоса	21	1.0	0.2	0.1	30	1.0	0.05	0.04	2.8
Целина невыбитая	17	0.9	0.1	0.03	30	0.9	0.03	0.01	1.8
Целина выбитая	17	0.5	0.05	0.01	30	0.5	0.01	0.005	0.8
Стерня яровой пшеницы	12	0.7	0.1	0.04	30	0.7	0.01	0.005	1.2
Плужная подошва	12	0.2	0.05	0.004	30	0.2	0.01	0.002	0.3

Моделирование и расчет суммарного испарения во время снеготаяния.

В процессе таяния снега земная поверхность увлажнена, и поэтому испарение с нее $E_{исп}$ можно считать равным испаряемости E_0

$$E_{исп} = E_0 \tag{8}$$

Испаряемость (E_0) зависит от энергетических ресурсов, которые могут быть израсходованы на испарение воды в конкретных условиях. Наиболее приемлем расчет испаряемости по дефициту влажности воздуха по формуле:

$$E_0 = K_{исп} * D, \tag{9}$$

где D – дефицит влажности воздуха, мб;

E_0 – слой испарившейся влаги, мм

$K_{исп}$ – эмпирический коэффициент, $K_{исп} = 0,55$ мм/мб.

В таблице 4 приведены значения усредненных актинометрических наблюдений на Покровском опытном участке. По формуле (9) рассчитывается слой испарившейся влаги. Для условий Южного Урала и Заволжья в средний по погодным условиям год значения коэффициента $K_{исп}$, определенные Ю.М. Нестеренко [4] опытным путем в зависимости от состояния земной поверхности и вида угодий, приведены в таблице 5.

Таблица 4. Усредненные актинометрические наблюдения в пгт. Чебеньки

Месяц, декада	Температура воздуха, Т (градус С)	Относительная влажность воздуха, $W_{отн}$	Дефицит влажности воздуха, D(мб)	Слой испарившейся влаги (мм)	
Март	1	-11	85	0,4	0,2
	2	-8	85	0,5	0,3
	3	-4	80	0,9	0,5
Апрель	1	0	75	1,8	1
	2	4	53	3,6	2
	3	9	43	5,4	3
Май	1	12	39	7,4	4
	2	15	38	8,6	4
	3	17	37	10	5
Июнь	1	19	38	11,3	6
	2	20	39	12	6
	3	21	40	12,7	6

Таблица 5. Коэффициент перехода $K_{исп}$ от испаряемости к суммарному испарению на сельхозугодьях для условий степной зоны в период снеготаяния

Поле яровой пшеницы						
Месяц	Апрель		Май			
Декада	II	III	I	II	III	
Фаза развития	Зябрь	Зябрь	Посев	Всходы	Кущение	
Коэффициент перехода	0.30	0.30	0.41	0.73	0.65	
Поле кукурузы						
Месяц	Апрель		Май			
Декада	II	III	I	II	III	
Фаза развития	Зябрь	Зябрь	Зябрь	Посев	3-й лист	
Коэффициент	0.3	0.3	0.26	0.26	0.44	
Поле люцерны на зеленую массу						
Месяц	Апрель			Май		
Декада	I	II	III	I	II	III
Фаза развития		От-раст.	От-раст.	От-раст.	От-раст.	Бутон.
Коэффициент	0.3	0.4	0.9	0.9	1.0	1.4

Выполненные И.А. Кузником и Ю.М. Нестеренко [9], расчеты показали, что для условий Заволжья и Южного Урала коэффициент корреляции между среднемесячными значениями испаряемости, рассчитанными по тепловому балансу, и значениями испаряемости, рассчитанными по дефициту влажности воздуха, находится в пределах 0.90-0.95. Поэтому применение формулы (9) в

условиях аридных зон дает практически допустимые значения.

Уравнения (1) - (9) составляют теоретический базис математической модели и алгоритма расчета поверхностного стока.

Алгоритм расчета поверхностного стока со склона в зависимости от интенсивности таяния снега на Южном Урале.

1. По результатам полевых и лабораторных измерений определяется коэффициент фильтрации, что позволяет рассчитать потенциальный слой впитывания влаги на водосборе.

2. Задается слой талой воды согласно (6), поступившей на водосбор. Задав измеренный или полученный по данным Гидрометслужбы слой поступившей воды, далее реализуется оперативный расчет поверхностного стока.

3. Определяется суммарное испарение на склоне согласно (9).

4. Сравниваются возможный суммарный объем расходных статей водного баланса с запасами воды в снеге.

5. При превышении значением слоя талой воды значений запасов расходных статей водного баланса рассчитывается поверхностный сток и уточняется реальный объем расходных статей. В противном случае поступившей на водосбор воды не достаточно для образования (продолжения) поверхностного склонового стока – поверхностный склоновый сток прекращается (прерывается).

6. Осуществляется переход к следующим суткам наблюдения поверхностного стока.

Алгоритм позволяет, имея исходные данные об объемах снеготазпасов с учетом их распределения на изучаемой территории, о режиме солнечной радиации, о дефиците влажности воздуха, о фильтрационных свойствах подстилающих почво-грунтов, о значениях эмпирических коэффициентов модели (коэффициентов испарения и фильтрации), проводить моделирование различных сценариев динамики поверхностного стока на различных типах угодий с разнообразными типами рельефов поверхности, осуществлять прогнозное имитационное моделирование поверхностного склонового стока.

На рисунке 1 дана диаграмма - результат работы алгоритма, на которой представлены изменения скорости таяния снега, впитывания, испарения и поверхностного стока талой воды на пашне и выбитой целине за период снеготаяния на Покровском опытном участке.

Суточная интенсивность снеготаяния изменяется от 0 мм/сутки до 24

мм/сутки. Показатели впитавшейся воды на склоне изменяются от 0 мм/сутки до 19 мм/сутки. Интенсивность испарения изменяется от 0 мм/сутки до 5 мм/сутки в конце расчетного периода наблюдения. Имея рассчитанные или измеренные значения приходных и расходных статей водного баланса (приток с вышележащей территории водосбора, стои талой воды, испарения, инфильтрации на склоне) из уравнения (3) рассчитывается суточный поверхностный склоновый сток (интенсивность поверхностного стока) как остаточного элемента уравнения (3).

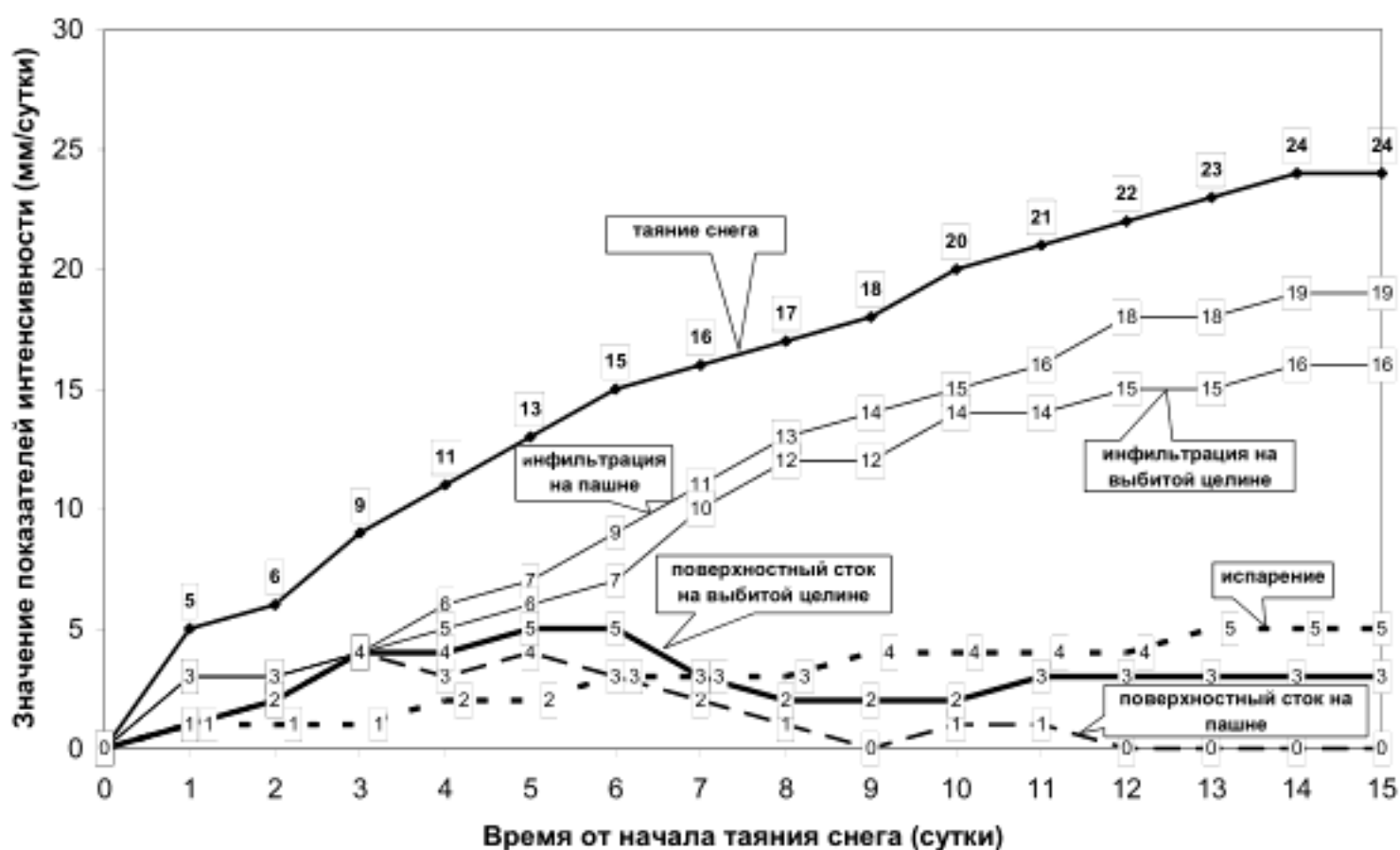


Рис. 1. Усредненные показатели интенсивности таяния снега и баланса талых вод на пашне и выбитой целине.

Поскольку расчеты поверхностного стока проводились в одних и тех же природных условиях, то интенсивности снеготаяния и испарения на пашне и выбитой целине практически совпадают. По этой причине интенсивность снеготаяния и интенсивность испарения на обоих рисунках представлены одними и теми же графиками.

Коэффициент фильтрации зависит от вида угодий. На пашне он достигает значения 19 мм/сутки на 15 сутки наблюдения, на выбитой целине соответственно – 16 мм/сутки в конце периода. Соответственно интенсивность впитывания на пашне превышает аналогичный показатель на выбитой целине в 1,3 раза. Как следствие, увеличивается интенсивность поверхностного стока на выбитой

целине. Если на пашне поверхностный сток практически прекращается на девятые сутки, достигая максимума в 3 мм/сутки на шестые сутки таяния снега, то на выбитой целине поверхностный сток не прекращается в течение всего периода таяния снега, достигая максимума 5 мм/сутки на пятые-шестые сутки таяния снега.

Сравним результаты моделирования склонового стока с реальными результатами наблюдений на гидрологическом посту.

На рисунке 2 представлены результаты наблюдений за пятилетний период (1982-1986 гг.) поверхностного стока на водосборе реки Самара в створе поста №74, отметка 118,21 Б.С. у пгт. Новосергиевка.

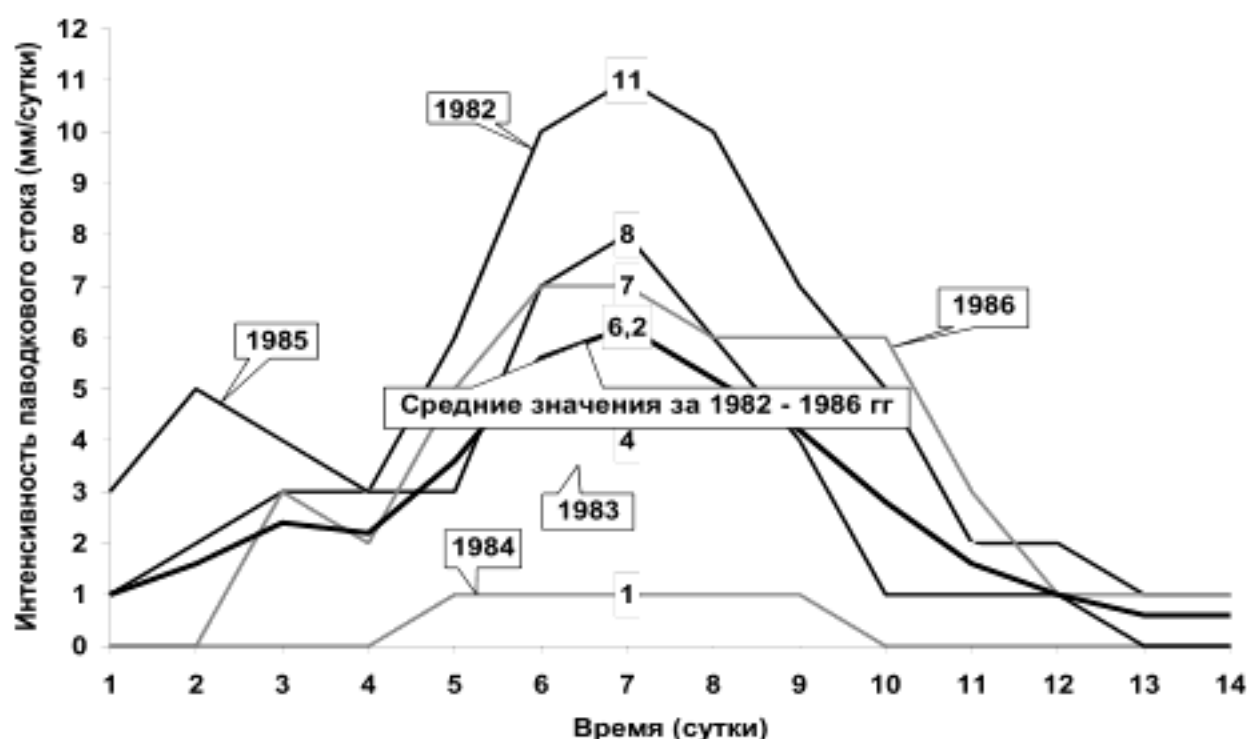


Рис. 2. Интенсивность поверхностного стока талых вод на водосборе реки Самары в 1981–1986 гг.

Поскольку измерения проводились на гидрологическом посту, расположенном сравнительно близко с истоком реки, то поверхностный сток с водосбора от водораздела до соответствующего измерительного створа не был подвержен значительной трансформации, и поэтому на водосборе выдержаны достаточно однородные условия склонового стока. Отмечены максимумы суточной интенсивности стока по годам и среднее значение максимума суточной интенсивности поверхностного стока за период наблюдений.

Сравнивая эти графики с соответствующими графиками интенсивностей поверхностного стока, изображенными на рисунке 1, на них можно заметить

общие тенденции в динамике поверхностного стока. Все кривые поверхностного стока имеют унимодальный вид (за исключением кривой поверхностного стока на р. Самара в 1985 г. в виду особых погодных условий этого года).

Максимумы интенсивностей год от года существенно различались от 1 мм/сутки в 1984 г. до 11 мм/сутки в 1982 г.. Среднее значение максимумов интенсивностей поверхностного стока равно 6,2 мм/сутки, то есть это значение близко к прогнозным, определяемым по рис. 1, что подтверждает адекватность методики измерений статей водного баланса и значений усредненных параметров эмпирических уравнений. При наличии измеренных региональных геологических, гидрологических и техногенных параметров (настройке модели) математическая модель может быть применена не только на Южном Урале, но и в других регионах для практического расчета поверхностного стока изучаемой территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Академия, 2008. 320 с.
2. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007.
3. Система нормативных документов в строительстве. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004.
4. Нестеренко Ю.М. Водная компонента аридных зон. Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2006. 286 с.
5. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х т. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. М.: Изд-во МГГУ, 1998. Т.1. 611 с.
6. Кузник И.А., Безменов А.И. Просачивание талых вод в мерзлую почву. Почвоведение, 1963. 7: 34-39.
7. Калюжный И.А., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 160 с.
8. Львович М.И. Вода и жизнь: Водные ресурсы, их преобразование и охрана. М.: Мысль, 1986. 254 с.
9. Кузник И.А., Нестеренко Ю.М. Опыт изучения испарения с поля яровой пшеницы в условиях Саратовского Заволжья. Сб. науч. работ Саратовского СХИ. Саратов, 1971. Вып. 5: 21-23.

Поступила 06.02.2012

(Контактная информация: Нестеренко Юрий Михайлович - заведующий отделом геоэкологии ОНЦ УрО РАН, д.г.н. E-mail: geoecol-onc@mail.ru; адрес: Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Набережная, 29)