

ISSN 2304-9081

Учредители:
Уральское отделение РАН
Оренбургский научный центр УрО РАН

Бюллетень
Оренбургского научного центра
УрО РАН
(электронный журнал)



2014 * № 2

On-line версия журнала на сайте
<http://www.elmag.uran.ru>

© Коллектив авторов, 2014

УДК 556.5:551.579.2

Ю.М. Нестеренко, И.И. Бондаренко, М.Ю. Нестеренко, В.В. Влацкий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА С АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЁННЫХ ВОДОСБОРОВ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО УРАЛА

Оренбургский научный центра УрО РАН, Отдел геоэкологии, Оренбург, Россия

Цель. Создание алгоритма, позволяющего проводить параметрическое имитационное моделирование процесса поверхностного стока.

Материалы и 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. Представлены математическая модель формирования поверхностного стока и алгоритм его расчета

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

Y.M. Nesterenko, I.I. Bondarenko, M.Y. Nesterenko, V.V. Vlatsky

MODELING OF SURFACE RUNOFF FROM ANTHROPOGENIC MODIFIED CATCHMENT AREAS IN THE STEPPE ZONE ON THE EXAMPLE OF THE SOUTHERN URALS

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

Objective. The creation of the algorithm, which allows to perform parametric simulation of the process of surface runoff.

Materials and methods. The values of the components of water balance sheet are determined as a function of solar radiation and are set according to the hydro-meteorological service. The values of the coefficients of the filter is determined on the basis of field and laboratory measurements.

Results. The mathematical model of formation of a superficial drain and algorithm of calculation

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

Введение

Расчет составляющих поверхностного склонового стока представляет собой сложную многопараметрическую задачу. В России ведутся в этом направлении исследования группой петербургских гидрологов под руководством профессора Ю.Б. Виноградова [1, 2]. В работе А.Н. Гельфана [3] рассмотрен обобщенный динамико – стохастический подход к моделированию формирования стока талых вод. Система нормативных документов СП 33-101-2003 [4] 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, 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.

В таблице 1 показана динамика изменений весеннего стока и коэффициента стока ($K_{ст}$) с водосборов малых и средних рек в Оренбургской области в зависимости от доли зяби (K_3) на водосборе. В бассейнах рек Самара, Ток и Салмыш в довоенные годы при 12% зяби на водосборе $K_{ст}$ составлял 0,51; в годы Великой Отечественной войны (1941-1945 гг.) в силу сложившихся обстоятельств, снизивших культуру земледелия, при доле зяби на водосборе 5% $K_{ст}$ увеличился до 0,74. В послевоенные годы при K_3 , равном 12% он уменьшился до довоенных 0,53 и затем продолжал уменьшение до 0,25-0,30 при K_3 , равном 52-56%. Аналогичные изменения в паводковом стоке произошли и в бассейнах других рек региона. Эти данные свидетельствуют о необходимости моделирования паводкового стока с учетом хозяйственной деятельности на водосборе.

Модель включает фундаментальные физические законы образования поверхностного стока, дополненные измерениями в полевых и лабораторных условиях динамики впитывания влаги в почво-грунты и коэффициента фильтрации, дефицита влажности воздуха на исследуемой территории [5].

Таблица 1. Динамика изменений поверхностного стока талых вод с водосборов рек в среднем по расчетным периодам в зависимости от хозяйственной деятельности в центральной агроклиматической зоне Оренбургской области

Годы, период в земледелии	Осадки зимние, мм	Поверхностный сток, мм	Коэффициент стока	% зяби на водосборе	% пахотных земель
1936-1941, I	91	47	0,52	12	40
1942-1945, II	116	86	0,74	5	
1946-1954, II	129	68	0,53	12	48
1955-1965, III	154	58	0,38	20	63
1966-1975, IV	133	35	0,25	52	67
1976-1985, V	130	34	0,26	56	64
1986-1990, V	161	49	0,30	53	63
1991-1995, V	165	78	0,48	36	56
2001-2005, VI	170	84	0,49	10	48
2006-2010, VI	165	58	0,35	16	54

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.

Талая вода расходуется на впитывание в почву, испарение и поверхностный сток.

Математическая модель основана на системе балансовых уравнений

$$U_{\text{ПР}} + A_3 + A_B = E_{\text{ИСП}} + \Phi_{\text{ИН}} + U_{\text{СТ}}, \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{ИН}} = \Delta M_{\text{АС}} + \Phi_{\text{АС}}, \quad (2)$$

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

A_3 , – зимние осадки;

A_B – зимние осадки;

$E_{\text{ИСП}}$ – 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.

Решим уравнение (1) относительно $U_{\text{СТ}}$:

$$U_{\text{СТ}} = U_{\text{ПР}} + A_3 + A_B - E_{\text{ИСП}} - \Phi_{\text{ИН}} \quad (3)$$

На водоразделе $U_{\text{пр}}=0$ и уравнение (3) примет вид:

$$U_{\text{СТ}} = A_3 + A_B - E_{\text{исп}} - \Phi_{\text{ин}} \quad (4)$$

Ниже приведены алгоритмы расчета приходных и расходных статей водного баланса.

Моделирование и алгоритм расчет поступления талой воды и осадков во время таяния снега.

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

Уравнение теплового баланса для рассматриваемого участка поверхности имеет вид:

$$R = LN + B + V \quad (5)$$

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

LN – 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 закона 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 осредненные показатели, которые дают практически адекватные результаты, позволяющие изучать процесс таяния снега. В период наступившего снеготаяния интенсивность снеготаяния зависит, прежде всего, от элемента теплового баланса LN .

Жидкие атмосферные осадки в период таяния снега являются ускоряющим фактором в связи с дополнительным поступлением тепла.

Среднесуточные затраты тепла на таяние снега и сопутствующее ему испарение мало зависят от широты местности. По исследованиям Ю.М. Нестеренко[5] 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 2 представлены исследования теплообмена LN и средней скорости снеготаяния по данным пгт Чебеньки.

Таблица 2. 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	0,19	23,42
1963	0,156	19,2
1964	0,098	12,1
1965	0,145	17,8
1966	0,195	24
1967	0,185	22,8
1968	0,161	19,8
Среднее за 1962-1968 гг	0,161	19,9

Аналогичные данные на Ершовском опытном участке, расположенном в близких климатических условиях Саратовской области представлены в таблице 3.

Таблица 3. Средний радиационный баланс и средняя скорость снеготаяния во время инсоляции на Ершовском опытном участке в апреле 1960-1965 гг.

Годы наблюдения	Радиационный баланс кал/(см ² ·мин)	Слой талой воды (мм/сутки)
1960	0,193	23,80
1961	0,192	23,70
1962	0,217	26,78
1963	0,168	20,62
1964	0,144	17,70
1965	0,194	23,93
Среднее за 1960-1965 гг.	0,185	22,78

Сравнение данных таблице 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 Орен-

бургской области. Так и должно быть вследствие широтной зональности этих территорий и соответствующего возрастания периода инсоляции в Саратовском Заволжье

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 определяется по эмпирической формуле:

$$A_3 = K_T * LN, \quad (6)$$

где A_3 – запас воды в снеге, мм;

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

K_T – коэффициент пропорциональности, $K_T = 164.3$ (мм*мин*см²)/кал.

В общем случае при наличии нескольких значений актинометрических наблюдений в сутки и учетом многолетних наблюдений рассчитывается средневзвешенный слой талой воды.

Моделирование и расчет инфильтрации талой воды в почву во время таяния снега. Расчет впитавшейся воды $\Phi_{ин}$ ведется по формуле:

$$\Phi_{ин} = f * t, \quad (7)$$

где $\Phi_{ин}$ – слой впитавшейся воды в почво-грунты;

f – коэффициент (ин)фильтрации или интенсивность впитывания талых вод в почво-грунты;

t – расчетное время.

Определение многопараметрической функции $f(t)$ представляет сложную гидрологическую задачу [6]. Инфильтрация талых вод определяется изменяющимися во время таяния снега водно-физическими свойствами почв, их влажностью и температурой [5, 7-11]. 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.

Наши исследования 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 4.

Таблица 4. Скорость впитывания талых вод в мерзлые суглинистые южные черноземы Южного Предуралья на различных угодьях в зависимости от их влажности и температуры, мм/мин

Угодье	Естественная влажность			Наименьшая влагоемкость			Коэффициент фильтрации		
	Исходная влажность	Температура почвы, $^{\circ}\text{C}$			Исходная влажность % от массы	Температура почвы, $^{\circ}\text{C}$			
		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 таяния снега. В процессе таяния снега земная поверхность увлажнена и поэтому испарение с нее $E_{\text{исп}}$ можно считать равным испаряемости E_0 : $E_{\text{исп}} = E_0$ (8)

Испаряемость (E_0) зависит от энергетических ресурсов, которые могут быть израсходованы на испарение воды в конкретных условиях. Расчеты испаряемости по составляющим теплового баланса по методике С.И. Харченко [12] или В.С. Мезенцева [13] в производственных условиях затруднительны из-за отсутствия достаточно густой сети теплобалансовых станций. Наиболее прием-

лем расчет испаряемости E_0 по дефициту влажности воздуха по формуле:

$$E_0 = K_{\text{исп}} * D, \quad (9)$$

E_0 – слой испарившейся влаги, мм;

$K_{\text{исп}}$ – эмпирический коэффициент, $K_{\text{исп}} = 0,55$ мм/мб;

где D – дефицит влажности воздуха, мб.

Выполненные И.А. Кузником и Ю.М.Нестеренко [14] 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.

В таблице 5 приведены значения усредненных метеорологических наблюдений. По формуле (9) рассчитывается и слой испарившейся влаги.

Таблица 5. Усредненные метеорологические наблюдения в пгт. Чебеньки

Месяц, декада	Температура воздуха, T °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	10,0	5
Июнь	1	19	38	11,3	6
	2	20	39	12,0	6
	3	21	40	12,7	6

Для условий Южного Урала и Заволжья в средний по погодным условиям год значения коэффициента $K_{\text{исп}}$, определенные Ю.М. Нестеренко [5] опытным путем в зависимости от состояния земной поверхности и вида угодий приведены в таблице 6.

Таблица 6. 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		Отрас- тание	От- раст.	От- раст.	От- раст.	Бутон.
Коэффициент	0.3	0.4	0.9	0.9	1.0	1.4

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. Вычисляется слой талой воды согласно (3).

Алгоритм позволяет, варьируя исходные данные объемов запасов снега с учетом их распределения на изучаемой территории, их динамике за время таяния снега, режиме солнечной радиации, дефиците влажности воздуха, фильтрационных свойствах подстилающих почво-грунтов, значениях эмпи-

рических коэффициентов модели (коэффициентов испарения и фильтрации), проводить имитационное моделирование различных сценариев динамики поверхностного стока на различных типах угодий с разнообразными типами рельефов поверхности, расположенной на ней, осуществлять прогнозное имитационное моделирование поверхностного склонового стока.

На рисунке 1 изображена диаграмма - результат работы алгоритма, на которой представлены изменения интенсивности таяния снега, впитывания, испарения и поверхностного стока талой воды на пашне за период таяния снега на Покровском опытном участке. Суточная интенсивность таяния снега 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.

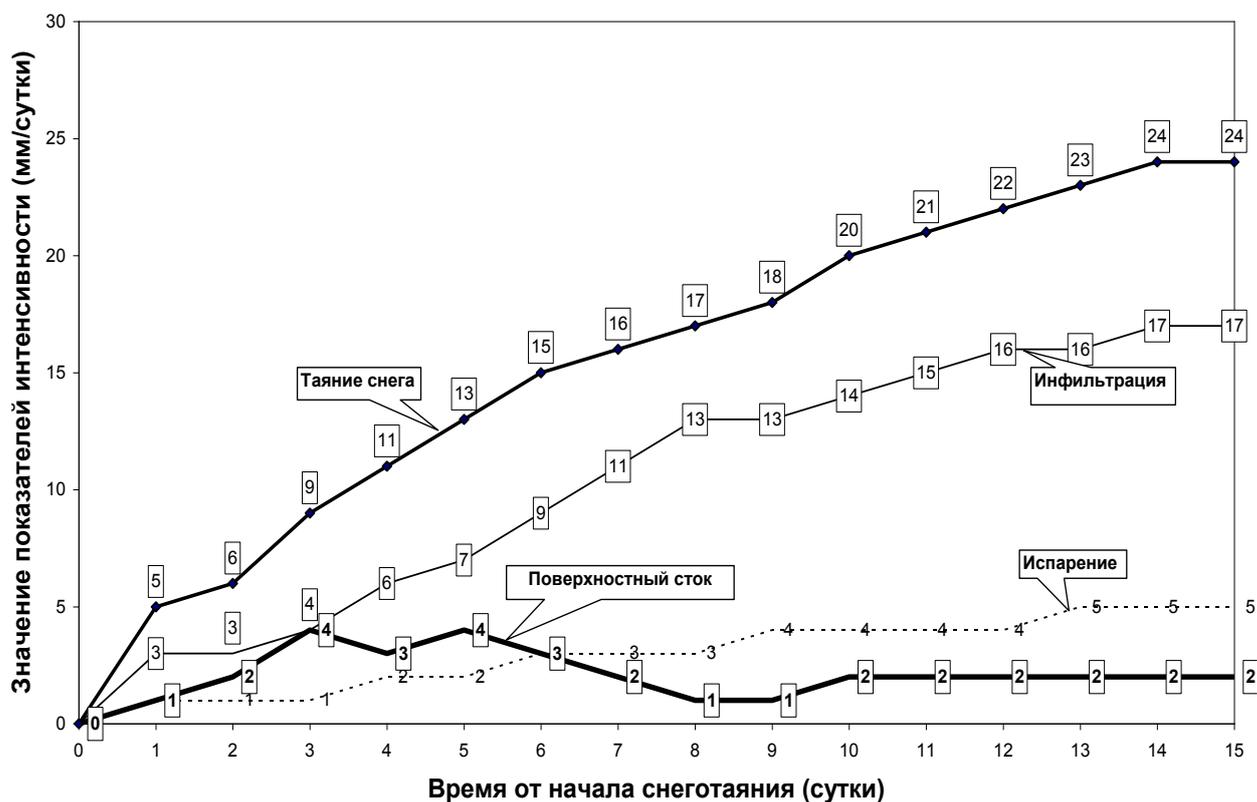


Рис. 1. Усредненные показатели интенсивности таяния снега и баланса талых вод на пашне и выбитой целине при естественной влажности соответственно 10 и 17%.

Имея рассчитанные или измеренные значения приходных и расходных статей водного баланса (приток с вышележащей территории водосбора, стои талой воды, испарения, инфильтрации на склоне), рассчитывается суточный

поверхностный склоновый сток (интенсивность поверхностного стока) как остаточного элемента уравнения (3).

Аналогичные показатели составляющих баланса талых вод для выбитой целины представлены на рисунке 2.

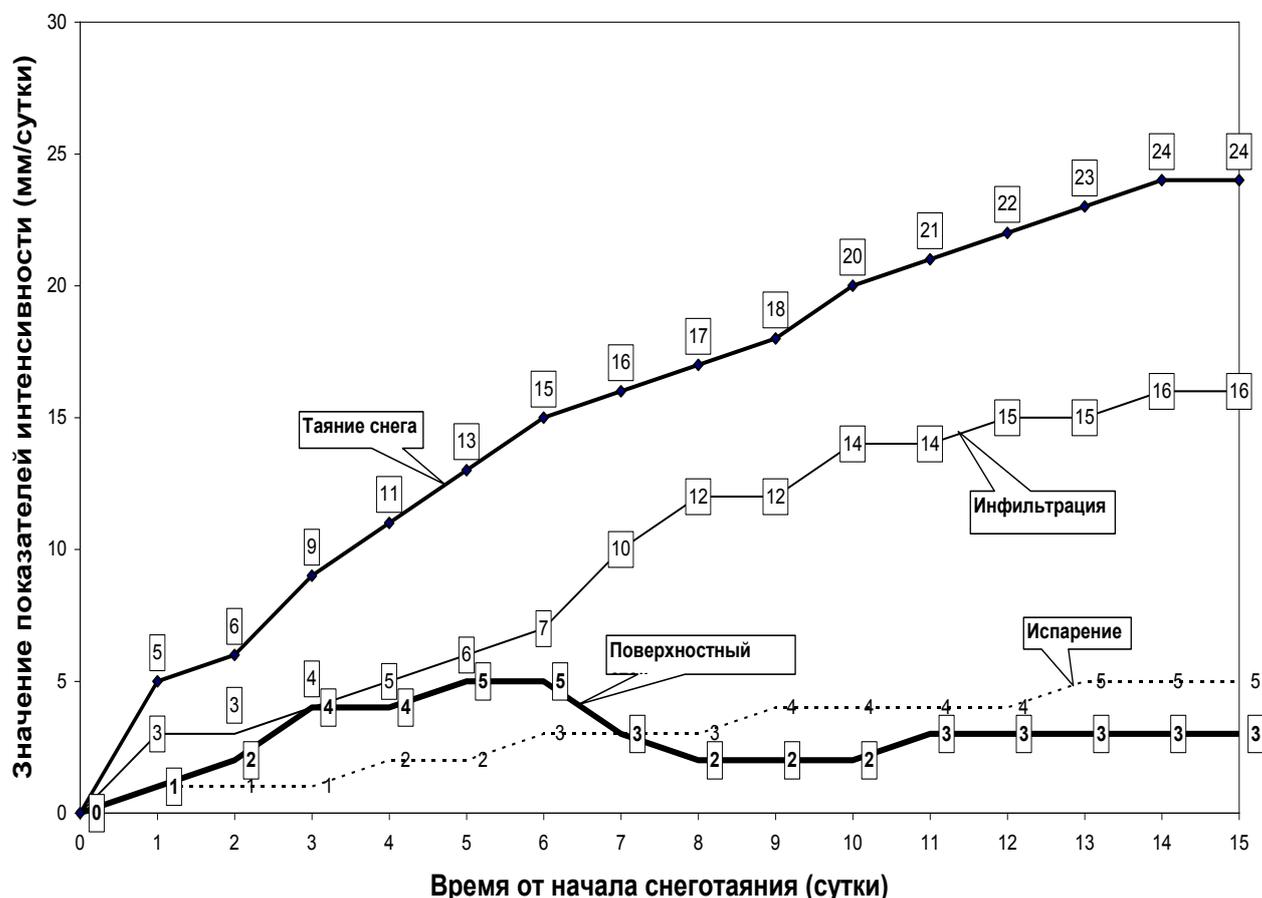


Рис.2. Усредненные показатели интенсивности таяния снега и баланса талых вод на выбитой целине.

Поскольку расчеты поверхностного стока проводились в одних и тех же природных условиях, то интенсивности таяния снега и испарения на пашне и выбитой целине практически совпадают - поэтому интенсивность таяния снега и интенсивность испарения на обоих рисунках представлены одними и теми же графиками.

Особый интерес представляет соотношение динамики таяния снега и инфильтрации в почво-грунты на исследуемых водосборах. Интенсивность таяния снега превышает инфильтрацию на пашне в диапазоне третьих – седьмых суток паводка. Как следствие, в этот период и наблюдается поверхностный сток. В дальнейшем, по мере прогревания почво-грунтов, инфильтрация возрастает и поверхностный сток прекращается.

На выбитой целине, ввиду малой интенсивности инфильтрации, поверхностный сток определяется интенсивностью таяния снега, а при наличии достаточных запасов воды в нем может наблюдаться продолжительный поверхностный сток, не прекращающийся в течение всего периода таяния снега.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Академия. 2008. 320 с.
3. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007.
4. Система нормативных документов в строительстве. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004.
5. Нестеренко Ю.М. Водная компонента аридных зон. Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2006.
6. 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.
7. Кузник И.А., Безменов А.И. Просачивание талых вод в мерзлую почву. Почвоведение. 1963. 7: 34-39.
8. Калюжный И.А., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 160 с.
9. Мосиенко Н.А. Агрогидрологические основы орошения. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 216 с.
10. Субботин А.И. Сток талых и дождевых вод (по экспериментальным данным). М.: Гидрометеиздат, 1966. 377 с.
11. Львович М.И. Вода и жизнь: Водные ресурсы, их преобразование и охрана. М.: Мысль, 1986. 254 с.
12. Харченко С.И. Гидрогеология орошаемых земель. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 374 с.
13. Мезенцев В.С. Мировой водный и теплоэнергетический баланс и теплооборот на земле. Водные ресурсы, 1982. 3: 46-49.
14. Кузник И.А., Нестеренко Ю.М. Опыт изучения испарения с поля яровой пшеницы в условиях Саратовского Заволжья. Сб. научных работ Саратовского СХИ. Саратов, 1971. Вып. 5: 21-23.

Поступила 25.06.2014 г.

*(Контактная информация: **Нестеренко Юрий Михайлович** – доктор географических наук, заведующий отделом геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН, 460014, г. Оренбург, ул. Набережная, 29, тел./факс 8 (3532) 770660, e-mail: [geoecol-
onc@mail.ru](mailto:geoecol-
onc@mail.ru))*