СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ. АГРОНОМИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-01

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF THE METHODOLOGY FOR FORECASTING THE SURFACE RUNOFF OF MELT WATER IN THE VOLGA AND DON BASINS

A.T. Barabanov

*Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective
Afforestation of the Russian Academy of Sciences*

Received 19.05.2021

Submitted 21.07.2021

*The research was carried out within the framework of the state task
No. 0713-2019-0003 "Theoretical foundations of the erosion-hydrological process in catchment basins, conceptual directions, ways and principles of creating highly effective environmental management systems for this process in order to completely prevent soil erosion" (state registration no. AAAA19-119042290013-8) funding for the Ministry of science and higher education of the Russian Federation*

Summary

Although the statistical approach to forecasting spring slope runoff brings us closer to solving this problem, it does not allow us to obtain a sufficiently accurate and representative result. It is necessary to theoretically substantiate the genesis of the process of interaction of melt water with frozen soil. As a result of many years of research, a complex interaction of natural and anthropogenic factors in the formation of meltwater runoff has been revealed. This fundamental knowledge allows us to take a new approach to the assessment of the hydrological process and create a methodology for its forecasting.

Annotation

Introduction. The problem of combating soil erosion is very urgent and has not yet been resolved. Its solution should be carried out on the basis of knowledge of the laws of the erosion-hydrological process and the identification of its connection with natural and anthropogenic factors. When predicting the spring slope runoff, the influence of many factors is usually considered, but often unreasonably preference is given to snow reserves. **Object.** The object of research was the generalization and analysis of long-term experimental material obtained as a result of research by several generations of scientists from the All-Russian Research Agroforestry Institute and other research institutions. The aim of the study was to scientifically substantiate and develop a flow forecasting methodology. **Materials and methods.** Experimental studies were carried out at runoff-erosion stations in the forest-steppe, steppe and dry-steppe zones using the balance method. The runoff plots were laid on different agricultural backgrounds with a size of 20 by 100 m. The runoff was taken into account on them and the indicators necessary for assessing the runoff-forming role of natural factors were determined. **Results and discussion.** The author experimentally established and theoretically substantiated that out of all the variety of factors that many researchers take into account when predicting runoff, only three natural factors affect the formation of spring slope runoff: the depth of soil freezing, the moisture content of its upper layer, and water reserves in the snow. Freezing depth is the most powerful factor. When the soil freezes to a depth of less than 50 cm (or it is thawed), runoff is not formed regardless of the level of other factors. With a greater depth of freezing, the runoff is formed depending on the level of these factors. The role of snow storage in the formation of runoff is assessed ambiguously. Under some conditions, the runoff does not depend on the snow reserves, and under others, the runoff value is highly dependent on them, although they do not directly affect the runoff, but it is formed depending on the water reserves in the snow and the upper soil layer. Soil moisture plays an active role, and snow reserves passive. The algorithm has been developed for the interaction of natural factors and forecasting of slope runoff based on its relationship with these factors.

Key words: runoff forecasting, soil moisture, depth of soil freezing, snow reserves, water absorption, the law of limiting flow factors, ice screen, porosity of the soil.

Citation. Barabanov A. T. Scientific substantiation of the methodology for forecasting the surface runoff of melt water in the Volga and Don basins. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021. 4(64). 14-25 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-01.

Author's contribution. The author of this study directly planned, performed and analyzed the results of this study.

Conflict of interest. The author declares that there is no conflict of interest.

УДК 631.6.02

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ТАЛЫХ ВОД В БАССЕЙНАХ ВОЛГИ И ДОНА

А. Т. Барабанов, доктор сельскохозяйственных наук

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград, Россия

Дата поступления в редакцию 19.05.2021

Дата принятия к печати 21.07.2021

*Исследования проведены в рамках выполнения государственного задания
№ 0713-2019-0003 «Теоретические основы эрозионно-гидрологического процесса
на водосборных бассейнах, концептуальные направления, пути и принципы создания
высокоэффективных экологических систем управления этим процессом с целью
полного предотвращения эрозии почв» (№ госрегистрации АААА-А19-119042290013-8)*

Актуальность. Проблема борьбы с эрозией почв очень актуальна и до сих пор не решена. Решение ее должно осуществляться на основе знания законов эрозионно-гидрологического процесса и выявления связи его с природными и антропогенными факторами. При прогнозировании весеннего склонового стока обычно рассматривается влияние многих факторов, но часто предпочтение необоснованно отдают снегозапасам. **Объектом** исследований было обобщение и анализ многолетнего экспериментального материала, полученного в результате исследований нескольких поколений ученых ВНИАЛМИ и других научно-исследовательских учреждений. Целью исследования было научное обоснование и разработка методики прогнозирования стока. **Методика.** Экспериментальные исследования проводились на стоково-эрозионных стационарах в лесостепной, степной и сухостепной зонах с применением балансового метода. Стоковые площадки закладывались на разных агрофонах размером 20 на 100 м. На них учитывали сток и определяли показатели, необходимые для оценки стокообразующей роли природных факторов. **Результаты и обсуждение.** Автором экспериментально установлено и теоретически обосновано, что на формирование весеннего склонового стока из всего многообразия факторов, которые учитывают многие исследователи при прогнозировании стока, влияют только три природных фактора: глубина промерзания почвы, влажность ее верхнего слоя и запасы воды в снеге. Глубина промерзания является наиболее мощным фактором. При замерзании почвы на глубину меньше 50 см (или она талая), сток не формируется независимо от уровня других факторов. При большей глубине промерзания сток формируется в зависимости от уровня этих факторов. Роль снегозапасов в формировании стока оценивается неоднозначно. При одних условиях сток не зависит от снегозапасов, а при других – величина стока в сильной степени зависит от них, хотя непосредственно они на сток не влияют, а формируется он в зависимости от запасов воды в снеге и верхнем слое почвы. Влажность почвы играет активную роль, а снегозапасы – пассивную. Разработан алгоритм взаимодействия природных факторов и прогнозирования склонового стока на основе связи его с этими факторами.

Ключевые слова: прогнозирование стока, поверхностный сток, глубина промерзания почв, снегозапасы, закон лимитирующих факторов стока, ледяной экран, порозность почвы.

Цитирование. Барабанов А. Т. Научное обоснование методики прогнозирования поверхностного стока талых вод в бассейнах Волги и Дона. *Известия НВ АУК.* 2021. 4(64). 14-25. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-01.

Авторский вклад. Автор настоящего исследования непосредственно планировал, выполнял и анализировал результаты данного исследования.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Вопрос прогнозирования речного и поверхностного (склонового) стока очень сложный. Речной сток в значительной степени связан со склоновым. Реки питаются за счет грунтового и склонового стоков. Доля весеннего склонового стока в общем речном большая, она может быть до 50-70 % [10]. Грунтовое питание относительно стабильное, и на него влияет меньшее количество факторов. Поверхностный сток, по мнению многих исследователей, подвержен влиянию большого количества факторов при сложном их взаимодействии [3, 4, 7, 8, 12, 18, 21]. Их изучение осуществлялось многими исследователями-гидрологами, эрозиоведами, геоморфологами, почвоведом и др. В результате получен очень большой материал, характеризующий роль факторов, обуславливающих формирование стока. На основе этих исследований было разработано много разных методов, моделей, уравнений расчета (прогноза) речного и поверхностного (склонового) стока.

В настоящее время проблема пропуска весенних паводков на реках Волга и Дон очень актуальна для нашей страны. В регионах обычно создаются чрезвычайные противопаводковые комиссии, которые часто в связи с отсутствием надежного прогноза стока из-за опасения не справиться с пуском паводковых вод, что может привести к катастрофическим последствиям, сбрасывают зимой очень много воды из водохранилищ, подготавливая их к весеннему паводку, которого потом не хватает для разных отраслей хозяйства страны: энергетики, водного, сельского, рыбного, коммунального и др. Управление режимом стока осуществляется на основе прогнозов низкой точности. Поэтому управленческие решения бывают также невысокого качества и даже бывают ошибочными. Повышенный сброс воды из каскада водохранилищ зимой и укороченный период паводка весной нарушает режим обводнения Волго-Ахтубинской поймы, условия нереста рыбы, судоходства и др.

ФНЦ агроэкологии РАН (ранее ВНИАЛМИ) сейчас обладает уникальным экспериментальным материалом, который позволяет сделать важные теоретические и практические разработки [3]. Нами установлено и научно обосновано, что по 2-3 ведущим факторам можно делать долгосрочный (2-3 месяца) высокоточный (80-100 %) прогноз.

Материалы и методы. В гидрологических исследованиях сейчас применяются статистические и генетические методы [1]. Статистические методы, базирующиеся на допущении случайности проявления явлений, дают возможность осуществлять приближенные вычисления, которые не могут быть распространены на обширные территории. Они не могут удовлетворить потребности гидрологии, и для решения фундаментальных проблем требовалось развитие теоретических исследований. Генетический подход, базирующийся на теоретическом анализе связей гидрологического процесса с природными и антропогенными факторами, получил широкое применение в гидрологии, в том числе и при изучении склонового стока с сельскохозяйственных угодий (сельскохозяйственная гидрология). В этой области гидрологии пока накоплено мало материала, поэтому регулирование стока и борьба с эрозией осуществляются либо без расчетов, либо на основе приближенных расчетов, что можно делать, применяя статистические методы. Генетический подход получил пока малое распространение. В наших исследованиях и при анализе материалов мы использовали оба метода. Сток формируется под влиянием многих природных факторов и хозяйственной деятельности людей. Нам важно знать, через какие факторы и как происходит влияние на гидрологические процессы. Для получения

ответа на эти вопросы закладывались стоковые площадки шириной 20 м и длиной 100 м. На них осуществляли определение запасов воды в снеге и почве, характера снегоотложения, глубины промерзания почвы, характера ее оттаивания, влажности почвы, объемной массы мерзлой почвы, стока талых вод, метеорологических показателей (температура, влажность воздуха, осадки, ветер, облачность и др.) и др. наблюдения.

Результаты и обсуждение. В результате обобщения многолетних (60-68 лет) результатов исследований элементов водного баланса в бассейнах Волги и Дона были определены средние и разной вероятности превышения показатели стока (таблица 1) и построены кривые его обеспеченности. Они показывают, что на рыхлой пашне лесостепи сток образуется в 5-6 лет из 10-ти, а на уплотнённой пашне – 7-8 лет, и величина его значительно больше. В степной зоне сток формируется на рыхлой пашне 3-4 года в десятилетие, а в сухостепной – 1-2 года. На уплотнённой пашне эти показатели были 7-8 лет из десяти. Средние показатели склонового стока увеличиваются при движении с юга на север от сухой степи к лесостепи. Величина стока разной обеспеченности также увеличивается при движении с юга на север. Сток 10-процентной вероятности превышения увеличивается с 41 до 78 мм. По годам эта тенденция иногда нарушается, наблюдается инверсия стока. Гидрометеорологические условия, бывает, складываются так, что в лесостепи стока нет, а в степи он может быть большой. Это связано с тем, что сток очень сильно зависит от природных факторов (запасы воды в снеге и почве, степень ее промерзания), которые связаны с гидрометеорологическими условиями, формирующимися под воздействием различных климатических факторов, изменяющихся в разных зонах по годам.

Таблица 1 – Показатели склонового стока в лесостепи и степи на разных типах почв

Table 1 – Indicators of slope runoff in the forest-steppe and steppe on different types of soils

Природная зона, почва / Natural zone, soil	Сред нее / Mean	Вероятность превышения, % / Probability of exceeding, %					C _v	C _s
		1	5	10	50	90		
Лесостепь, серая лесная/ Forest-steppe, Grey forest	$\frac{30}{20}$	$\frac{156}{129}$	$\frac{101}{81}$	$\frac{78}{59}$	$\frac{19}{11}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,27}{1,52}$	$\frac{1,68}{1,96}$
Лесостепь, темно-серая лесная / Forest-steppe, Dark-grey forest	$\frac{37}{20}$	$\frac{169}{118}$	$\frac{115}{74}$	$\frac{91}{55}$	$\frac{28}{11}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,07}{1,36}$	$\frac{1,45}{2,07}$
Лесостепь, выщелоченный чернозем / Forest-steppe, Chernozems leached	$\frac{37}{15}$	$\frac{192}{98}$	$\frac{123}{61}$	$\frac{93}{44}$	$\frac{20}{6}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,44}{1,76}$	$\frac{1,41}{1,55}$
Степь, обыкновенный чернозем ¹ / Steppe, Chernozems ordinary ¹	$\frac{32}{9}$	$\frac{157}{88}$	$\frac{102}{53}$	$\frac{78}{38}$	$\frac{19}{3}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,30}{2,40}$	$\frac{0,95}{2,11}$
Степь, обыкновенный чернозем ² / Steppe, Chernozems ordinary ²	$\frac{36}{7}$	$\frac{124}{54}$	$\frac{91}{33}$	$\frac{75}{24}$	$\frac{30}{3}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,87}{1,79}$	$\frac{0,88}{2,05}$
Сухая степь, темно- каштановая / Dry steppe, Dark-chestnuts	$\frac{17}{5}$	$\frac{84}{37}$	$\frac{55}{21}$	$\frac{42}{15}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,24}{1,80}$	$\frac{1,72}{2,31}$
- светло-каштановая / - Light chestnuts	$\frac{15}{3}$	$\frac{75}{38}$	$\frac{52}{20}$	$\frac{41}{12}$	$\frac{12}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,19}{2,43}$	$\frac{1,14}{3,42}$

Примечание. В числителе уплотненная пашня, в знаменателе рыхлая пашня; 1 – Воронежская обл., 2 – Самарская обл.; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии.

Note. In numerator – Thickened cropland, in denominator – Tillage cropland; 1 – Voronezh region, 2 – Samara region; C_v – coefficient of variation; C_s – asymmetry coefficient.

Анализ хода динамики стока (рисунок 1) показывает, что величины его как на рыхлой, так и на уплотненной пашне колеблются в значительной степени во всех зонах и отмечается резкое снижение его в последние два десятилетия. Это связано с тем, что почва перед весенним снеготаянием почти все эти годы в лесостепной и степной зонах Русской равнины была талая или промерзала на небольшую (до 50 см) глубину.

Рисунок 1 – Динамика весеннего склонового стока на темно-каштановых почвах степи

Figure 1 – Dynamics of spring slope runoff on dark chestnut steppe soils

Таким образом, в многолетних исследованиях выявлены нормативные величины поверхностного стока с рыхлой и с уплотнённой пашни. Полученные научные материалы являются необходимыми для расчётных методов прогнозирования стока, разработки и проектирования противоэрозионных комплексов.

Наша методика базируется на следующих наиболее важных новых результатах теоретических работ [1, 2]:

- закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод, позволяющий по-новому рассматривать закономерности его формирования;
- положение о том, что почва при промерзании глубже 50 см способна впитывать талую воду только верхним (0-30 см) слоем и удерживать количество воды, равное объему свободных пор, максимальная величина которого может достигать полной влагоемкости;
- математические модели расчета весеннего склонового стока талых вод;
- концепция формирования «ледяного экрана».

Излагаемые ниже закономерности гидрологического процесса и полученные на их основе модели, в т.ч. математические, являются результатом исследований ВНИАЛМИ, анализа и обобщения информации, полученной из литературных источников, а также обоснования новых концептуальных подходов к объяснению процессов инфильтрации воды в почву и стока талых вод.

Автором из множества природных факторов, используемых многими исследователями для прогноза стока [5–9, 14–18, 21], были определены только три важнейших фактора, мощно влияющих на формирование стока, и открыт закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод [1, 2]. Суть его состоит в том, что при некотором (лимитирующем) значении одного из трех факторов (глубина промерзания и влажность почвы, снеготопливы) сток не формируется независимо от уровня других. Определены также максимальные значения факторов, при которых сток не образуется.

Факт отсутствия стока талых вод при уровнях природных факторов ниже лимитирующих установлен экспериментально и теоретически на уровне фундаментального закона, то есть выявлен генезис процесса и создана теория его формирования. Это послужило основой для создания методики высокоточного прогноза стока при этих условиях его формирования, а также для разработки высокоэффективных стокорегулирующих и противоэрозионных приемов путем воздействия на эти факторы.

При уровнях же факторов, превышающих лимитирующие, сток формируется на всех угодьях при любых условиях. Объем его связан только с влажностью верхнего слоя почвы и запасов воды в снеге. Генезис этого процесса недостаточно изучен, и в литературе можно встретить разные подходы к его толкованию. Мы на основе регрессионного анализа результатов исследований в годы, когда сток формировался, разработали статистические модели расчета его величины на разных типах почв и агрофонов (таблица 2) [2]. В общем виде связь стока с этими природными факторами выражается уравнением $Y = a + b_1x_1 + b_2x_2$, где x_1 – запасы воды в почве, x_2 – снеготопливы.

Таблица 2 – Уравнения связи весеннего склонового стока с запасами воды в почве W_n и снеге W_c , мм на рыхлой Y_p и уплотненной пашне Y_n

Table 2 – Equations of relationship between spring slope runoff and water storage in soil W_n and snow W_c , mm on tillage Y_p and compacted cropland Y_n

Зона, почва / Natural zone, soil	Рыхлая пашня / Tillage cropland	Уплотненная пашня / Thickened cropland
Лесостепь, серая лесная / Forest-steppe, Grey forest	$Y_p = -141 + 0,08W_n + 0,38W_c$ $R_{Y_pW_nW_c} = 0,93$; $M_{yx} = 12,4$	$Y_n = -16,4 - 0,15W_n + 0,34W_c$ $R_{Y_nW_nW_c} = 0,81$; $M_{yx} = 13,3$
Лесостепь, серая лесная / Forest-steppe, Dark-grey forest	$Y_p = -57 + 0,34W_n + 0,26W_c$ $R_{Y_pW_nW_c} = 0,61$; $M_{yx} = 26,8$	Нет данных / No data
Типичный чернозем / Chernozems typical	$Y_p = -50 + 0,25W_n + 0,25W_c$ $R_{Y_pW_nW_c} = 0,92$; $M_{yx} = 4,5$	$Y_n = -116 + 0,71W_n + 0,41W_c$ $R_{Y_nW_nW_c} = 0,74$; $M_{yx} = 16,0$
Степь, обыкновенный чернозем ¹ / Steppe, Chernozems ordinary ¹	$Y_p = -40 + 0,19W_n + 0,38W_c$ $R_{Y_pW_nW_c} = 0,54$; $M_{yx} = 21,5$	$Y_n = -12 + 0,06W_n + 0,69W_c$ $R_{Y_nW_nW_c} = 0,91$; $M_{yx} = 6,8$
Степь, обыкновенный чернозем ² / Steppe, Chernozems ordinary ²	$Y_p = -53 + 0,51W_n + 0,04W_c$ $R_{Y_pW_nW_c} = 0,48$; $M_{yx} = 8,4$	$Y_n = -24 + 0,17W_n + 0,40W_c$ $R_{Y_nW_nW_c} = 0,92$; $M_{yx} = 7,0$
Сухая степь, Каштановая / Dry steppe, Chestnuts	$Y_p = -27 + 0,38W_n + 0,29W_c$ $R_{Y_pW_nW_c} = 0,96$; $M_{yx} = 7,1$	$Y_n = -4 + 0,19W_n + 1,14W_c$ $R_{Y_nW_nW_c} = 0,92$; $M_{yx} = 9,2$
светло-каштановая / Light chestnuts	$Y_p = -5,2 + 0,04W_n + 0,44W_c$ $R_{Y_pW_nW_c} = 0,64$; $M_{yx} = 6,3$	$Y_n = -21,9 + 0,26W_n + 0,22W_c$ $R_{Y_nW_nW_c} = 0,84$; $M_{yx} = 13,1$

Примечание. 1) – Воронежская обл., 2) – Самарская обл.;

Note. 1 - Voronezh Oblast, 2 - Samara Oblast.

По уравнениям связи видно, что процесс формирования стока двухфакторный, а по сути процесса – однофакторный, так как водопоглощение мерзлой почвой обуславливается запасами влаги в ней. Имея в виду что объем стока является разницей между снеготопливами и величиной впитывания талой воды в мерзлую почву, можем утвер-

ждать, что впитывающая способность почвы полностью обуславливается ее влажностью, вернее дефицитом влажности. В зональном плане эта связь проявляется по-разному. Эти уравнения при расчетах стока дают относительно хорошую сходимость, но репрезентативность их недостаточна для прогноза стока.

Статистический подход не полностью подходит для решения задачи прогнозирования стока. При уровнях факторов выше лимитирующих нужна теоретическая основа его формирования на базе знания генезиса гидрологического процесса. Для этого необходимо знать процесс впитывания талой воды в мерзлую почву с точки зрения обмена теплом между впитывающей водой и почвой, то есть выявить закономерности взаимодействия талой воды с мерзлой почвой. Этот процесс исследовался с позиций взаимодействия талой воды с мерзлой почвой многими учеными [1, 2, 11, 13, 15, 16, 19, 20]. Получен большой материал, отличающийся разнообразием трактовки его и сделанных выводов. Он не позволяет однозначно дать оценку роли природных факторов в формировании склонового весеннего стока. Анализ его опубликован в работе [1].

Автором сформулировано положение: мерзлая почва способна впитать и удерживать талую воду, количество которой потенциально может быть равно объему свободных пор оттаявшего сверху слоя, то есть свободная порозность обуславливает объем поглощения талой воды в почву [1]. Автором также экспериментально установлено, что почва за весь период снеготаяния в разных природных зонах и по годам успевает оттаивать за весь период паводка на небольшую глубину – от 3 до 30 см. Таким образом, водопоглощение в мерзлую почву определяется самым верхним слоем. Это означает, что количество впитавшейся талой воды максимально может быть равно объему свободных пор этого слоя почвы небольшой мощности.

Таким образом, при уровнях природных факторов выше лимитирующих всегда создаются условия для формирования весеннего стока и количество его зависит от запасов воды в снеге и верхнем (0-30 см) слое почвы. Этот слой при оттаивании увлажняется до полной влагоемкости. В нем может поглотиться количество талой воды, равное объему свободных пор (разницы между полной влагоемкостью и фактическими запасами воды), который, в свою очередь, зависит от запасов влаги в нем. Объем стока зависит от снегозапасов и объема свободных пор.

Прогнозирование весеннего склонового стока осуществляется по алгоритму, приведенному в таблице 3. Сначала анализируются данные по состоянию замерзания почвы на водосборе. Если почва промерзла на глубину не более 50 см или она талая, то склоновый весенний сток не сформируется. При замерзания почвы глубже 50 см анализируются данные по запасам воды в слое почвы 0-50 см. Если они в лесостепной зоне ниже 120 мм, а в степной и сухостепной зонах ниже 70 мм, то сток не формируется. Затем анализируются снегозапасы перед снеготаянием. Если воды в снеге накопилось меньше объема свободных пор в слое почвы 0–30 см, то склоновый сток не образуется.

При уровнях факторов выше лимитирующих, т. е. при промерзании почвы глубже 50 см, запасах влаги в почве (в слое 0-50 см) более 70-120 мм (по зонам), а в снеге – больше объема свободных пор в слое почвы 0–30 см, сток сформируется, и величина (объем) его будет зависеть только от запасов воды в почве и снеге. При этих условиях величина весеннего склонового стока с водосбора (Y , мм) рассчитывается по выражению:

$$Y = \left(\sum_{i=1}^n Y_i \cdot S_i / \sum_{i=1}^n S_i \right) - Y_{пэм},$$

где Y_i – сток с i -того агрофона, мм, рассчитывается по уравнениям (таблица 2); S_i – площадь i -того агрофона, га; $Y_{пэм}$ – стокорегулирующий эффект от системы противоэрозионных мероприятий.

Таблица 3 – Алгоритм прогнозирования весеннего склонового стока

Table 3 – Algorithm of spring slope runoff forecasting

Уровни природных факторов / Levels of natural factors			Характер стокообразования / Nature of runoff formation
глубина замерзания почвы, см / depth of soil freezing, cm	запасы влаги в слое почвы 0-50 см, мм / moisture reserves in the soil layer 0-50 cm, mm	запасы воды в снеге, мм / water reserves in snow, mm	
Менее 50 / Under 50	Любой / Anyone	Любой / Anyone	Сток не образуется / No runoff is formed
Более 50 / Over 50	Менее 70-120 (по зонам) / Less than 70-120 (by zone)	Любой / Anyone	Сток не образуется / No runoff is formed
	Более 70-120 (по зонам) / Over 70-120 (by zone)	Менее объема свободных пор в слое почвы 0-30 см / Less than the volume of free pores in the soil layer 0-30 cm	Сток не образуется / No runoff is formed
		Более объема свободных пор в слое почвы 0-30 см / More than the volume of free pores in the soil layer 0-30 cm	Сток образуется, величина его зависит от уровня запасов воды в снеге и почве / Runoff is formed, its magnitude depends on the level of water reserves in the snow and soil

Статистический подход не всегда позволяет получить прогноз весеннего склонового стока высокой точности. Для этого предложен способ прогноза стока на теоретической (генетической) основе по следующему уравнению [2]:

$$Y = W_c - \left[\left(1 - \frac{d_v}{d} \right) * 100 \right] * h * 10 - W_n,$$

где W_c – запасы воды в снеге, мм; W_n – запасы воды в почве, мм; h – мощность почвенного слоя, м; d_v – объемная масса почвы, г/см³; d – удельная масса почвы, г/см³

Выводы. Вопрос прогнозирования речного и склонового стока очень сложный. Управление режимом стока осуществляется на основе прогнозов низкой точности. Знание закономерностей его формирования на разных видах пашни позволяет более точно его прогнозировать и дифференцированно подходить к созданию системы мероприятий по управлению эрозионно-гидрологическим процессом.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать методику высокоточного прогноза склонового стока. Она базируется на важных новых результатах: законе лимитирующих факторов стока, позволяющем по новому рассматривать закономерности его формирования; концепции формирования ледяного экрана; положении о том, что почва при промерзании глубже 50 см способна впитывать талую воду только верхним (0-30 см) слоем и удерживать количество воды, равное объему свободных пор, максимальная величина которого может достигать полной влагоемкости; математических моделях расчета весеннего склонового стока талых вод, основанных на оценке связи его с природными факторами.

Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что на формирование весеннего склонового стока из всего многообразия факторов, которые учитывают многие исследователи при его прогнозировании, влияют только три природных фактора: глубина промерзания почвы, влажность ее верхнего слоя и запасы воды в снеге. Глубина промерзания является наиболее мощным фактором. При замерзании почвы на глубину меньше 50 см (или она талая) сток не формируется независимо от уровня других факторов. При большей глубине промерзания сток формируется всегда в зависимости от уровня этих факторов. Роль снегозапасов в формировании стока оценивается неоднозначно. При одних условиях сток не зависит от снегозапасов, а при других – величина его в очень сильной степени зависит от них, хотя непосредственно снегозапасы на сток не влияют, а формируется он в зависимости от запасов воды в снеге и верхнем слое почвы. Влажность почвы играет активную роль, а снегозапасы – пассивную. Разработан алгоритм взаимодействия природных факторов и прогнозирования склонового стока на основе связи его с этими факторами.

Выполненные разработки и предложенные математические модели позволяют создавать новые высокоэффективные противозрозионные приемы и осуществить важный шаг к формированию нового агролесомелиоративного адаптивно-ландшафтного обустройства сельскохозяйственных земель.

Библиографический список

1. Барабанов А. Т. Эрозионно-гидрологическая оценка взаимодействия природных и антропогенных факторов формирования поверхностного стока талых вод и адаптивно-ландшафтное земледелие. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. 188 с.
2. Барабанов А. Т. Оценка взаимодействия талой воды с мерзлой почвой // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3. С. 52-60.
3. Болгов М. В. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–84.
4. Болгов М. В. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. Гидрологические изменения РГО, ИД «Кодекс». 2018. Вып. 145. С. 206-218.
5. Бураков Д. А., Литвинова О. С. Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 111-120.
6. Гагаринова О. В. Ландшафтно-гидрологические закономерности формирования стока в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 55-60.
7. Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л. Современные особенности водного баланса крупных речных бассейнов Европейской части России. Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Новочеркасск: Лик, 2018. Т. 1. С. 55-62.
8. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А., Милюкова И. П. Долговременные фазы многолетних изменений водности Волги и Дона. Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Новочеркасск: Лик, 2018. Т. 1. С. 62-67.
9. Двинских С. А., Китаев А. Б., Михайлов А. В. Наводнения на реках бассейна Камы и организация защиты от них // География и природные ресурсы. 2010. № 4. С. 74-79.
10. Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А. Современные изменения поверхностного стока и инфильтрации талых вод на сельскохозяйственных угодьях в лесостепной и степной зонах Русской равнины и их последствия // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 78-91.
11. Калюжный И. Л., Лавров С. А. Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование. СПб.: Нестор-История, 2012. 616 с.

12. Кашутина Е. А., Ясинский С. В., Коронкевич Н. И. весенний поверхностный склоновый сток на русской равнине в годы различной водности. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 1. С. 37-46.

13. Комиссаров М. А., Габбасова И. М. Эрозия почв при снеготаянии на пологих склонах в Южном Предуралье // Почвоведение. 2014. № 6. С. 734-743.

14. Коронкевич Н. И., Георгиади А. Г., Ясинский С. В. О гидрологических изменениях // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 739-744.

15. Петелько А. И., Панов В. И. Влияние основных природных факторов на формирование поверхностного стока талых вод в лесомелиорированных агроландшафтах в лесостепной и степной зонах европейской части России // Научные ведомости. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43. № 1. С. 16-29.

16. Петелько А. И., Панов В. И. Характеристика поверхностного стока талых вод с разных угодий за 50 лет // Вестник АПК Ставрополя. 2014. № 4 (16). С. 155-162.

17. Ясинский С. В., Гусев Е. М. Динамико-стохастическое моделирование процессов формирования весеннего склонового стока на малых водосборах // Почвоведение. 2003. № 7. С. 761-774.

18. Ясинский С. В., Кашутина Е. А. Пространственные и временные закономерности изменения весеннего склонового и речного стока на Русской равнине // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 5. С. 71-81.

19. Chanasyk D. S. Effects of fall cultivation on runoff and erosion. Erosion knows no boundaries. 1989. P. 141-144.

20. Evahs R. Water erosion in british farmers fields: Some sauses, impacts, predictions. Progr. In phys. Gegraphy, 1990. P. 199-219.

21. Pimentel D., Burgess M. Soil erosion threatens food production // Agriculture. 2013. № 3(3). P. 443-463.

Conclusions. The issue of forecasting river and slope runoff is very complex. The flow regime is controlled on the basis of forecasts of low accuracy. Knowledge of the regularities of its formation on different types of arable land makes it possible to predict it more accurately and to take a differentiated approach to creating a system of measures to manage the erosion-hydrological process.

The theoretical and experimental studies carried out made it possible to develop a method for high-precision prediction of slope runoff. It is based on important new results – the law of limiting factors of runoff, which allows a new look at the patterns of its formation; the concept of ice screen formation; the position that the soil, when freezing deeper than 50 cm, is able to absorb meltwater only with the upper (0-30 cm) layer and retain an amount of water equal to the volume of free pores, the maximum value of which can reach full moisture capacity; mathematical models for calculating the spring slope runoff of meltwater, based on an assessment of its relationship with natural factors.

It has been experimentally established and theoretically substantiated that the formation of spring slope runoff from the whole variety of factors that many researchers take into account when predicting it is influenced only by three natural factors: the depth of soil freezing, the humidity of its upper layer and water reserves in the snow. The depth of freezing is the most powerful factor. When the soil freezes to a depth of less than 50 cm (or it is thawed), runoff is not formed regardless of the level of other factors. With a greater depth of freezing, the runoff is always formed depending on the level of these factors. The role of snow reserves in the formation of runoff is assessed ambiguously. Under some conditions, the runoff does not depend on snow reserves, and under others, the amount of runoff strongly depends on them, although they do not directly affect the runoff, but it is formed depending on the water reserves in the snow and the upper layer of the soil. Soil moisture plays an active role, and snow reserves play a passive role. An algorithm has been developed for the interaction of natural factors and the prediction of slope runoff based on its connection with these factors.

The completed developments and the proposed mathematical models make it possible to create new highly effective anti-erosion measures and take an important step towards the formation of a new agroforestry adaptive landscape arrangement of agricultural lands.

Reference

1. Barabanov A. T. Erosive-hydrological assessment of the interaction of natural and anthropogenic factors in the formation of surface runoff of meltwater and adaptive landscape agriculture. Volgograd: Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, 2017. 188 p.
2. Barabanov A. T. Assessment of the interaction of melt water with frozen soil. Proceedings of the Nizhnevolzhsky agrouniversitetskiy complex: science and higher professional education. 2021. No. 3. P. 52-60.
3. Bolgov M. V. Modern changes in minimum flow on the rivers of the Volga river basin // Meteorology and hydrology. 2014. No. 3. P. 75-84.
4. Bolgov M. V. Modern features of the hydrological regime of the rivers of the Volga basin // Questions of geography. Hydrological changes RGO, ID "Codex". 2018. Iss. 145. P. 206-218.
5. Burakov D. A., Litvinova O. S. Water-balance dependences for the forecast of melt water runoff in the south of the West Siberian plain // Geography and natural resources. 2010. No. 3. P. 111-120.
6. Gagarinova O. V. Landscape-hydrological patterns of flow formation in the Lake Baikal basin // Geography and natural resources. 2012. No. 3. P. 55-60.
7. Grigoriev V. Yu., Frolova N. L. Modern features of the water balance of large river basins of the European part of Russia: water resources of Russia: Current state and management: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Novocherkassk: Lik, 2018. V. 1. P. 55-62.
8. Georgiadi A. G., Kashutina E. A., Milyukova I. P. Long-term phases of long-term changes in the water content of the Volga and Don. Water resources of Russia: Current state and management: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Novocherkassk: Lik, 2018. V. 1. P. 62-67.
9. Dvinskikh S. A., Kitaev A. B., Mikhailov A. V. Floods on the rivers of the Kama basin and the organization of protection against them // Geography and natural resources. 2010. No. 4. P. 74-79.
10. Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Barabanova E. A. Modern changes in surface runoff and infiltration of meltwater on agricultural lands in the forest-steppe and steppe zones of the Russian Plain and their consequences // Water management in Russia: problems, technologies, management. 2018. No. 4. P. 78-91.
11. Kalyuzhny I. L., Lavrov S. A. Hydrophysical processes in the catchment area: Experimental studies and modeling. St. Petersburg: Nestor-History, 2012. 616 p.
12. Kashutina E. A., Yasinsky S. V., Koronkevich N. I. Spring surface slope runoff on the Russian plain in the years of different water content // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The series is geographical. 2020. V. 1. P. 37-46.
13. Komissarov M. A., Gabbasova I. M. Soil erosion during snowmelt on gentle slopes in the Southern Urals // Soil Science. 2014. No. 6. P. 734-743.
14. Koronkevich N. I., Georgiadi A. G., Yasinsky S. V. On hydrological changes // Questions of geography. 2018. No. 145. P. 739-744.
15. Petelko A. I., Panov V. I. The influence of the main natural factors on the formation of the surface runoff of meltwater in forested agricultural landscapes in the forest-steppe and steppe zones of the European part of Russia // Scientific Vedomosti. Series: Natural Sciences. 2019. V. 43. No. 1. P. 16-29.
16. Petelko A. I., Panov V. I. Characteristics of surface runoff of meltwater from different lands over 50 years // Bulletin of the Agroindustrial complex of Stavropol. 2014. No. 4 (16). P. 155-162.
17. Yasinsky S. V., Gusev E. M. Dynamic-stochastic modeling of spring slope runoff formation processes in small catchments // Soil science. 2003. No. 7. P. 761-774.
18. Yasinsky S. V., Kashutina E. A. Spatial and temporal patterns of changes in spring slope and river flow on the Russian plain // Izv. RAS. Ser. geogr. 2007. No. 5. P. 71-81.
19. Chanasyk D. S. Effects of fall cultivation on runoff and erosion. Erosion knows no boundaries. 1989. P. 141-144.

20. Evahs R. Water erosion in british farmers fields: Some sauses, impacts, predictions. Progr. In phys. Gegraphy, 1990. P. 199-219.

21. Pimentel D., Burgess M. Soil erosion threatens food production // Agriculture. 2013. № 3(3). P. 443-463.

Author's Information

Anatoly Timofeyevich Barabanov, chief researcher officer-head of the laboratory of soil protection from erosion of FSC of Agroecology of RAS (Russia, 400062, Volgograd, Universitetskiy Ave. 97), doctor of agricultural Sciences, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9945-654X> E-mail: barabanov-a@vfanc.ru tel. 8-961-694-08-44.

Информация об авторе

Барабанов Анатолий Тимофеевич, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией защиты почв от эрозии ФНЦ агроэкологии РАН (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97), доктор сельскохозяйственных наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9945-654X> barabanova@vfanc.ru тел. 8-961-694-08-44.

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-02

EFFECT OF AGROTECHNICAL CULTIVATION METHODS ON INCREASING THE PRODUCTIVITY OF SWEET PEPPER AND ON THE CHANGE OF QUALITATIVE INDICATORS OF FRUITS IN THE STORAGE PROCESS

E.V. Kalmykova¹, O.V. Kalmykova²

¹All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Volgograd

²Volgograd State Agrarian University, Volgograd

Received 01.09.2021

Submitted 10.11.2021

Abstract

Introduction. Open soil vegetable growing - in demand branch of crop production of the southern zone of the Russian Federation. A large role in the stabilization of yield belongs to the choice of safe technologies of cultivation and irrigation systems, also the selection of the most productive and adaptive varieties and hybrids of vegetable crops. The purpose of the research is to substantiate, on the basis of a systematic approach, a complex of agro-technical measures for realizing the productive potential of sweet pepper and the quality of its fruits when stored in the south of the Russian Federation. **Object.** The object of the study was: as a standard, a zoned variety of the studied culture - Gift of Moldova, as well as varieties of domestic and foreign selection for competitive testing: Paphos F₁, Pompeo F₁. **Materials and methods.** Research carried out in laboratory and field experiments (individual entrepreneur «Zaitsev V.A.» Gorodishchensky district, Volgograd region) in the period from 2011 to 2019 was carried out according to generally accepted methods. **Results and Conclusions.** Studies have shown that an improvement in nutrition against the background of sufficient moisture supply for vegetable plants in the root layer, especially during the period of fruit formation, entailed a proportional increase in yield from 90 and more t/ha of marketable products. At the same time, the largest increase was noted on the Pompeo F₁ hybrid: on the variant, subject to the elements of agricultural technology, for obtaining 50 t/ha - 33.5 t/ha, for obtaining 90 t/ha - 21.4 t/ha. The amount of biochemical substances in the fruit of sweet pepper was in close dependence on the variety and hybrid, irrigation regime, the degree of maturity and the duration of storage. On the fifth day of storage, the quality of the fetus of the biological degree of maturity decreased on average by grades by 23.6-27.7%, the technical degree of maturity is 1.1-1.2 times higher. When stored for twenty days, a worsening of the product type was observed due to the fading of fruits and a decrease in quality indicators. The Pompeo F₁ hybrid does not depend on the degree of maturity of the fruit and the applied irrigation regime, a higher dry matter content, the sums of sugars, ascorbic acid and lower nitrates were noted.

Key words: *sweet pepper, drip irrigation, productivity, abiotic stress factors, quality, preservation, biological and technical degree of maturity.*