Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
"Федеральный научный центр агроэкологии,
комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук" (ФНЦ агроэкологии РАН)

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ТАЛЫХ ВОД НА ВОДОСБОРАХ БАССЕЙНОВ РЕК ВОЛГИ И ДОНА

Волгоград∗ФНЦ агроэкологии РАН∗2019

УДК 631.6.02

Научные основы и методика прогнозирования поверхностного стока талых вод в бассейнах Волги и Дона / А.Т. Барабанов. – Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2019. – 36 с.

В работе дан анализ современного состояния оценки роли природных факторов в формировании стока талых вод, изложены материалы, характеризующие методы прогноза поверхностного стока талых вод с сельскохозяйственных угодий, приведена методика прогнозирования весеннего стока в бассейнах Волги и Дона.

Scientific bases and forecasting methodology of melt water surface runoff in the Volga and the Don basins / A. T. Barabanov. – Volgograd: FSC of agroecology RAS, 2019. – 36 c.

The paper gives an analysis of the current state of natural factors role assessment in the formation of melt water runoff, presents materials describing the forecasting methods of melt water surface runoff from agricultural lands, presents the forecasting technique of the spring runoff in the basins of the Volga and the Don.

Научные основы и методика прогнозирования поверхностного стока талых вод в бассейнах Волги и Дона подготовлены главным научным сотрудником – заведующим лабораторией защиты почв от эрозии ФНЦ агроэкологии РАН доктором сельскохозяйственных наук А.Т. Барабановым.

Научные основы и методика рассмотрены и одобрены ученым советом ФГБНУ "Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук" (протокол № 4 от 10 июня 2019 г.)

ISBN 978-5-9909843-1-8

© А. Т. Барабанов
© ФНЦ агроэкологии РАН, 2019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в РФ нет надежного прогноза поверхностного стока талых вод с сельскохозяйственных угодий на водосборных бассейнах. Ошибка прогноза стока в бассейнах Волги и Дона очень высокая. Часто прогнозируется очень большой сток, а он не формируется совсем или бывает очень слабый. При разработке прогноза по существующим методикам либо используется один фактор, либо десятки и даже сотни факторов. Чаще всего прогнозируют по снегозапасам. Ни то, ни другое неприемлемо. Нами доказано, что по 2-3 ведущим факторам можно делать долгосрочный (2-3 месяца) высокоточный (80-100%) прогноз. Зарубежный опыт нам не подходит, так как в большинстве стран формируется преимущественный ливневый сток, а в странах, где есть сток талых вод (США, Канада и др.) условия сильно отличаются от наших и нам не подходят. Для бассейна Волги и Дона нельзя переносить опыт прогноза стока, например, на бассейнах сибирских рек или рек европейской части РФ, впадающих в северные моря. Отсутствие надежного прогноза связано с тем, что нет хорошей теоретической основы для него. До сих пор не были выявлены закономерности формирования поверхностного стока талых вод с сельскохозяйственных угодий. В литературе много данных по влиянию природных факторов на сток талых вод. Однако эти факторы рассматриваются в основном без учета совокупности их влияния. Причем взгляды разных исследователей в значительной степени отличаются и даже бывают противоположными. Это объясняется тем, что ими использовались разные подходы, концепции и, главное, разные методы исследований. Все имеющиеся в литературе результаты исследований, обобщения и анализа связи стока талых вод с природными факторами, а также методы его прогнозирования в настоящее время не дают возможности однозначно определить роль тех или иных факторов в формировании стока, дать точный его прогноз и выявить пути его регулирования. Нужен новый методический подход к анализу имеющегося

материала и получению дополнительных данных.

В результате теоретических и экспериментальных исследований по аспектам теории рельефообразования и гидрологических процессов, выполненных в опытной сети ВНИАЛМИ в лесостепной, степной и полупустынной зонах, а также анализа и обобщения информации, полученной из литературных источников и обоснования новых концептуальных подходов к объяснению процессов инфильтрации воды в почву и стока талых вод, впервые в мире был сформулирован и обоснован закон лимитирующих факторов поверхностного стока и разработана методика его высокоточного прогноза. Таких разработок нет в нашей стране и за рубежом. Очень важны в этом отношении исследования факторов просачивания и стока талых вод в почву. Особую актуальность имеют результаты экспериментальных оценок с применением методов дождевания, водно-балансовых площадок и метода напуска. Полученные в экспериментах материалы за период свыше 60 лет вошли в "золотой фонд науки". Они позволили выдвинуть и обосновать новые теоретические положения, существенно уточняющие представления о физической природе гидрологических процессов, по-новому трактовать условия просачивания дождевых и талых вод в почву, что позволяет усовершенствовать существующие и разработать новые математические модели.

1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СТОКОМ И ПРИРОДНЫМИ ФАКТОРАМИ

1.1. Анализ материалов по оценке связи поверхностного стока с природными факторами

Планирование мер борьбы с эрозией почв должно осуществляться на основе знания закономерностей формирования поверхностного стока. Известно, что важнейшими факторами, влияющими на формирование стока, являются: увлажнение почвы перед снеготаянием, величина запасов воды в снеге, глубина промерзания почвы, интенсивность и продолжительность снеготаяния [1-3]. Большинство из них влияют на формирование стока комплексно, во взаимодействии. Сейчас в литературе имеется много материалов о роли различных факторов в формировании стока. Однако они, как правило, рассматриваются каждый в отдельности без учета совокупности их влияния. Причем взгляды разных исследователей в значительной степени различаются и даже бывают противоположными. Г. Ф. Басов и М. Н. Грищенко [4], исследуя этот вопрос в Воронежской обл., пришли к выводу, что с увеличением снегозапасов коэффициент стока увеличивается. С. И. Небольсин и П. П. Надев [5], проведя многолетние исследования в Московской обл., пришли к выводу о том, что с увеличением снегозапасов коэффициент стока уменьшается. И. П. Сухарев и Е. М. Сухарева [6] считают, что в ЦЧО с увеличением снегозапасов уменьшается коэффициент стока, а в некоторых случаях и величина стока. Результаты этих исследований относятся к условиям неравномерного распределения снежного покрова под влиянием лесных полос, где в примыкающих к ним зонах откладываются мощные снежные шлейфы. А. И. Чеботарёв и С. И. Харченко [7] пришли к выводу, что снегозапасы прямо влияют на сток весеннего половодья. Г. П. Сурмач [8] отмечает, что не всегда можно выделить в чистом виде влияние снегозапасов на сток, иногда накладывается дей-

ствие других факторов. Он приводит обобщенные им результаты исследований многих авторов на серых лесных и каштановых почвах, черноземах типичных, выщелоченных, обыкновенных и южных, которые указывают на то, что с увеличением запасов снеговой воды сток, как правило, возрастает. Одновременно с этим во многих случаях повышается и коэффициент стока. Им также на основании результатов исследований для района Тимашево Самарской обл. установлена математическая связь стока $У$ со снегозапасами X, которая выражается уравнением $У = 0{,}36X + 35{,}7$. На основании анализа этих связей Г. П. Сурмач пришел к выводу о том, что при разнообразии гидрометеорологических условий и агротехники взаимосвязь между мощностью снежного покрова и стоком проявляется по-разному. Для черноземно-степной и каштановой зон он выделил следующие случаи.

1. Снег ложится на иссушенную или умеренно влажную почву, сильные оттепели отсутствуют. В этих условиях сток с рыхлой пашни (а в ряде случаев и с уплотненной пашни) отсутствует независимо от глубины промерзания как при малой или нормальной, так и повышенной мощности снежного покрова.

2. Почва уходит в зиму во влажном состоянии, снежный покров устойчивый и сохраняется в течение всей зимы. В этих условиях на рыхлой пашне формируется очень слабый и слабый сток. По мере увеличения мощности снежного покрова в рамках обычных снегозапасов сток повышается, а его коэффициент остается на том же уровне. На уплотненной пашне, а в более северных районах на оподзоленных черноземах и серых лесных почвах и на зяблевой пахоте, увеличение мощности снежного покрова в таких условиях сопровождается значительным увеличением объема стока и некоторым повышением его коэффициента.

3. Снег выпал на переувлажненную в предзимний период и замерзшую почву и сохраняется в течение всей зимы. Вследствие этого весной даже на рыхлой пашне формируется умеренный и сильный сток, не говоря уже об уплотненной пашне и выгонах. По мере уве-

личения снегозапасов объем и коэффициент стока с рыхлой и особенно с уплотненной пашни повышаются.

4. Почва уходит в зиму различно увлажненной, зимой бывают глубокие оттепели с дождями, вызывающие частичное или полное стаивание снега. В дальнейшем почва замерзает в переувлажненном состоянии и теряет способность впитывать талую воду. В этих условиях сток и коэффициент стока с увеличением снегозапасов повышаются. В результате формируются сильные паводки. В местах, где в течение всей зимы сохраняется снежный покров мощностью не менее 20-25 см (например в приопушечной зоне лесополос), вся талая вода во время оттепелей просачивается в почву и исключается возможность образования поверхностной ледяной корки. Эти участки и в период завершающего весеннего снеготаяния могут поглощать талую воду, способствуя тем самым сокращению стока. В таких условиях слой и коэффициент стока имеют обратную связь с запасами снеговой воды.

5. Почва уходит в зиму при различном увлажнении, зимний период характеризуется неустойчивой погодой. Периоды умеренного похолодания сменяются оттепелями, осадки выпадают преимущественно в виде снега и дождя, почва слабо замерзает и вновь оттаивает, снежный покров неустойчивый. Весенний сток с зяби в такие годы отсутствует или бывает очень слабый, а с других сельскохозяйственных угодий – очень слабый и слабый до умеренного.

Таким образом, Г. П. Сурмачем проанализирована связь стока и коэффициента стока со снегозапасами в различных гидрометеорологических условиях, что позволило ему разработать схему прогнозирования стока [8] на качественном уровне – слабый, умеренный и т. д.

Е. В. Полуэктов [9-11] провел подобный анализ для условий североприазовских черноземов Ростовской области и сгруппировал различные сочетания факторов следующим образом:

I группа – почва с осени иссушена. В течение зимы несколько раз выпадает снег, который в результате непродолжительных оттепелей тает без образования стока. Почва промерзает на незначительную глуби-

ну. К весне снег в основном сосредоточен в ложбинах, лощинах, балках и лесных полосах. На рыхлой и уплотненной пашне сток отсутствует.

II – почва уходит в зиму различно увлажненной. Умеренно холодная, с частыми снегопадами зима прерывается оттепелями. Происходит частичное или полное стаивание снега с образованием небольшого стока. В дальнейшем почва замерзает в переувлажненном состоянии, водопроницаемость ее резко снижается. Большая часть выпадающих потом осадков стекает со склонов.

III – осенью и в первой половине зимы наблюдаются обильные дожди иногда со снегом, которые сильно увлажняют почву. Похолодание во второй половине зимы сопровождается кратковременными оттепелями. Весной количество осадков ниже нормы. В этих условиях весенний сток небольших объемов формируется на рыхлой и значительно больших – на уплотненной пашне.

IV группа – почва уходит в зиму при различном увлажнении. Зима характеризуется неустойчивой погодой, умеренное похолодание сменяется оттепелями, осадки выпадают в виде снега и дождя. Почва промерзает на небольшую глубину и вновь оттаивает, снежный покров неустойчив. На уплотненной пашне возможно образование ледяной корки. При таком сочетании условий сток талых вод на рыхлой пашне отсутствует или бывает очень слабым, на уплотненной пашне он слабый и умеренный. Группирование природных факторов по влиянию их на сток талых вод также позволило ему предложить метод прогноза стока с рыхлой и уплотненной пашни на качественном уровне. Им удалось глубоко и всесторонне проанализировать связь стока талых вод с природными и антропогенными факторами, но к сожалению прогноз стока не был формализован. Г. П. Сурмач [8] писал, что "прогнозирование стока талых вод, основанное на учете степени увлажнения почвы и погодных условий осенне-зимнего периода (температура воздуха, осадки, наличие оттепелей), не имеет строгой расчетной основы, и поэтому точность этого способа не высока".

В формализованном виде метод прогноза стока рек за период

половодья, который можно использовать с определенными допущениями для прогноза поверхностного стока, предложили Б. А. Аполлов, Г. П. Калинин, В. Д. Комаров [12] на основе анализа связи водопоглотительной способности почвы бассейна перед началом снеготаяния с природными факторами. Ими предложено следующее выражение для определения стока рек за период половодья:

$$У = S - P_o(1 - e^{s/p}), \quad (1)$$

где $У$ – речной сток в период половодья, мм; S – запасы воды в снеге и ледяной корке, мм; P_o – параметр, характеризующий водопоглотительную способность бассейна перед началом снеготаяния и представляющий собой максимально возможные потери талых вод при таянии снежного покрова с большим, практически бесконечно большим, запасом воды, мм.

Для рек центральной части степной и лесостепной зон европейской территории СССР ими была установлена зависимость параметра P_o от глубины промерзания L и льдистости слоя почвы 0-100 см или влажности ее в мерзлом состоянии W. На основе анализа многолетних наблюдений за стоком, снежным покровом, промерзанием почвы, ее влажностью и другими факторами половодья получена эмпирическая формула

$$P_o = 750e^{-0,051we} - 0,051WL. \quad (2)$$

Глубина промерзания в этой формуле ограничена 60 см, т. е. все большие величины приравнены к 60 см. Этот подход обладает следующими недостатками:

1. Его можно использовать для расчета поверхностного стока с некоторыми допущениями, так как он разрабатывался для речного стока.

2. Формула (2) показывает, что водопоглотительная способность почвы зависит от глубины ее промерзания, начиная с любой величины больше нуля. Это не так. Экспериментальные данные свидетельствуют (что будет показано ниже) о том, что при глубине промерзания почвы до 50 см сток талых вод отсутствует при любом уровне снегозапасов и увлажнения почвы.

3. Для установления связи стока с льдистостью достаточно иметь

влажность мерзлого слоя почвы 0-50 см, а не 0-100 см, как принято у авторов. Дело в том, что за период снеготаяния впитывание талой воды в почву происходит только до 25-30 см, т. е. в процесс водопоглощения вовлечен небольшой слой почвы и его достаточно для оценки влажности как природного фактора стока. Вовлечение более глубоких слоев почвы в расчеты приводит к увеличению ошибки прогноза.

4. Влажность почвы определяется перед началом зимы и делается поправка на увлажнение во время зимних оттепелей. Это тоже приводит к ошибке. Лучше это делать непосредственно перед снеготаянием.

В. Д. Комаров [13, 14] выявил важную роль теплофизического взаимодействия талой воды с мерзлой почвой. Последующие исследования этого вопроса углубили понимание сути процесса впитывания талой воды в мерзлую почву [15-17]. Наибольший интерес представляют исследования И. Л. Калюжного, К. К. Павловой и С. А. Лаврова [18], которые разработали концепцию формирования в мерзлой почве "запирающего слоя", суть которой заключается в том, что при некотором соотношении влажности и температуры мерзлой почвы в ней формируется водонепроницаемый слой. Отмечая большую роль промерзания и влажности почвы в формировании поверхностного стока талых вод и важность концепции "запирающего слоя" для понимания процесса взаимодействия талой воды с мерзлой почвой, следует отметить несогласованность результатов расчетов "запирающего слоя" с данными экспериментов авторов концепции. Выявлены случаи больших различий в стоке при равных мощностях "запирающего слоя", что не позволяет использовать эти результаты при прогнозировании стока.

Е. А. Гаршинёвым [19] выдвинута и обоснована концепция "ледяного экрана", формирующегося на границе талого и мерзлого слоев почвы. Ее суть состоит в том, что при оттаивании верхнего слоя почвы по границе с мерзлым слоем происходит полное перекрытие всех пор почвы льдом и инфильтрация влаги в обычном ее понимании замещается процессом "термоинфильтрации" – протаиванием почвы в результате ее теплообмена за счет притока тепла извне. Формирова-

ние "ледяного экрана" и обусловливает сток талых вод даже в условиях, когда верхний мерзлый слой почвы не насыщен полностью.

Н. И. Алексеевский, Н. П. Фролова, М. М. Антонова, М. И. Игонина [20], проанализировав очень большой материал, характеризующий связь речного стока Волги с обусловливающими его факторами, пришли к выводу, что в лесной зоне годовой сток почти линейно связан с суммой годовых осадков, в лесостепной зоне эта связь ослабевает, а в южной части бассейна Волги годовой сток в большей степени зависит от количества осадков за холодный период, т. е. от снегозапасов.

В. В. Демидов [21] выявил связь стока C со снегозапасами S, интенсивностью таяния снега X, временем полного оттаивания мерзлого слоя почвы r_x, параметром, характеризующим долю водонепроницаемого слоя почвы, приходящуюся на единичную высоту снежного покрова K, суммой положительных температур за период стока $\sum t$ и продолжительностью снеготаяния T. Она выражается уравнением

$$C = 3{,}23 \cdot 10^{-2} \cdot S^{0{,}85} \cdot X^{0{,}7} \cdot r^{0{,}58} \cdot K^{1{,}15} \cdot \Sigma t \cdot T^{0{,}25}. \qquad (3)$$

В уравнении (3) придается большое значение факторам, которые не играют существенной роли в формировании стока (интенсивность снеготаяния, время полного оттаивания мерзлого слоя почвы, соотношение мощности водонепроницаемого слоя почвы и высоты снега, сумма положительных температур и продолжительность снеготаяния), малая роль отводится снегозапасам и совсем не учитываются такие мощные природные факторы, как увлажнение почвы и глубина ее промерзания.

Г. П. Сурмач, М. М. Ломакин, А. П. Шестакова [22] разработали прогноз коэффициентов стока. Они предложили рассчитывать их по уравнению

$$K_{пр} = (\alpha X^n - вX - cH + d)x(1 + 0{,}0000055P^2_{ос}), \qquad (4)$$

где $K_{пр}$ – прогнозируемый коэффициент стока; X – средняя влажность почвы в мерзлом слое, %; H – глубина мерзлого слоя, см; $P_{ос}$ – влагозапасы в снеге и ледяной корке, мм; α, $в$, c, d, n – параметры уравнения, зависящие от типа и уплотненности почв (для зяби черноземов и

каштановых почв соответственно 0,000185; 0,0025; 0,0125; 0,03; 1,25; для рыхлой и уплотненной пашни серых лесных почв, уплотненной пашни черноземов и каштановых почв соответственно 0,000398; 0,0039; 0,0101; 0,075; 1,10).

Как видно из уравнения (4) коэффициент стока талых вод в сильной степени зависит от снегозапасов, влажности мерзлого слоя почвы и его глубины. Это уравнение также имеет ряд недостатков. Во-первых, при отсутствии снега возможен сток. Это противоречит здравому смыслу. Во-вторых, по уравнению получается, что чем больше глубина промерзания, тем больше сток. Это не так, на что указывается в работах А. Т. Барабанова, Б. А. Апполова, В. Д. Комарова [3, 12]. В-третьих, влажность почвы определяется в слое, равном глубине ее промерзания. В этом нет необходимости, достаточно определить ее до глубины 30-50 см. Вовлечение большей глубины (а глубина промерзания почвы бывает до 150-200 см) приводит к сильному варьированию влажности почвы и к большой ошибке при выявлении связи стока талых вод с природными факторами и его прогнозировании.

В. Е. Водогрецкий с соавторами [23] предлагает оценку изменения поверхностной составляющей речного стока осуществлять на основании зависимости $\alpha = f(U_t, I)$, (5)

где α – коэффициент склонового весеннего стока; U_t – показатель, характеризующий степень увлажненности в метровом слое и промерзаемости почвогрунтов в период, предшествующий стоку; I – уклон склона.

В качестве значения U_t приняты произведения суммарных влагозапасов U в слое 100 см на сумму отрицательных значений температуры воздуха $\sum(-t)$ за период от начала устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С до 1 января.

Зависимость (5) не может правильно отражать связь поверхностного стока с природными факторами по следующим причинам. Во-первых, в уравнении не учитываются снегозапасы, хотя известно, что они сильно влияют на сток и коэффициент стока. Во-вторых, произведение влагозапасов на сумму отрицательных температур (индекс

U_t) не может отражать уровень водопроницаемости почв. Известно, что снег хорошо изолирует почву и состояние ее часто не зависит от температуры воздуха, т. е. при большой сумме отрицательных температур воздуха почва может остаться талой и сохранить впитывающую способность на высоком уровне. В-третьих, от уклона поверхностный сток талых вод почти не зависит [1, 2, 24]. Г. П. Сурмач [1] писал, что "в отношении влияния уклона на сток талых вод мы, как и М. И. Львович и др., считаем, что оно весьма незначительно или вовсе отсутствует. Такой вывод обосновывается следующими соображениями: во-первых, интенсивность впитывания талых вод почвой мало зависит от нанорельефа поверхности, наличия травостоя и других вышеуказанных факторов, так как роль основного фактора, обеспечивающего контакт воды с почвой (ее затопление), выполняет снежный покров; во-вторых, при отсутствии снежного покрова вследствие пониженной инфильтрационной способности мерзлой почвы уклон также очень слабо влияет на величину стока".

П. А. Шеппель [25] на основании математической обработки 25-летнего ряда наблюдений получил следующие уравнения расчета притока паводковых вод W_n к каскаду водохранилищ Волжско-Камского бассейна в зависимости от максимальных снегозапасов h:

$$W_n = 14{,}7\sqrt{h},\ \text{км}^3; \qquad (6)$$

$$W_n = 0{,}94h + 54,\ \text{км}^3. \qquad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) видно, что поверхностный сток с бассейна Волги находится в прямой связи со снегозапасами, т. е. чем больше снега, тем больше сток. Это противоречит многочисленным данным. Сток зависит не только от снегозапасов, но и от других факторов, которые находятся в сложном взаимодействии.

Д. А. Бураков и О. С. Литвинова [26], анализируя роль факторов в формировании речного стока, отмечают, что в районах с глубоким промерзанием почвы влияние многолетней изменчивости глубины промерзания не сказывается на колебаниях потерь стока весеннего половодья по годам. Важным фактором формирования талого стока в

этих районах является осеннее увлажнение бассейнов.

О. Н. Урбанова и Д. А. Семанов [27], разрабатывая прогноз притока воды в пруды Татарии, отмечают, что часто при высоких снегозапасах сток половодья может быть низким и, наоборот, при небольших – очень высоким. Причинами такого несоответствия они считают сложившуюся к началу снеготаяния метеорологическую обстановку и различные по величине потери воды на испарение и фильтрацию. Поэтому при прогнозировании стока, по мнению авторов этого прогноза, кроме данных о снегозапасах на водосборе, необходимо учитывать сведения о ходе среднесуточных температур воздуха, об осеннем и весеннем (перед паводком) увлажнении почвы, об осадках, выпадающих в период снеготаяния, о промерзаемости почвы для определения потерь на фильтрацию.

С. А. Двинских, А. Б. Китаев, А. В. Михайлов [28], изучая многолетнюю динамику изменения климатических факторов, выявили, что наиболее отдаленным признаком высокого половодья является необычно теплая и дождливая осень и запас снеговой воды. Однако, как отмечают авторы, в 1979 г. запас воды в снеге в 1,5 раза превышал норму, а наводнения не произошло. Они считают, что анализ всех факторов, вызывающих наводнения, пока не позволяет построить модель их формирования из-за противоречивости результатов.

О. В. Гагаринова [29] исповедует ландшафтно-гидрологический подход к исследованию природных факторов, оказывающих влияние на формирование речного стока. Она использует целый ряд физико-географических параметров: геологическое строение, экспозицию склонов, средний уклон водосбора, густоту речной сети, лесистость территории, заболоченность и т. д.

На подходах Гидрометцентра России к прогнозам стока остановимся подробнее, так как по его прогнозам осуществляется попуск весеннего паводка на Волжско-Камском каскаде водохранилищ.

По В. М. Мухину [30], "объем весеннего половодья (притока воды в водохранилище) определяется по многим постоянным и пере-

менным факторам. В основе методов прогноза объема воды за половодье лежат различные формы его зависимостей от стокоформирующих факторов, одна часть из которых непосредственно измеряется, другая – рассчитывается и еще часть служит лишь косвенными характеристиками первых. К первым относятся запасы воды в снежном покрове и ледяной корке на почве, влажность того или иного слоя почвы и ее глубина промерзания, осадки, характеристики почвы – прежде всего ее водопроницаемость, температура и дефицит влажности воздуха, которые определяют интенсивность таяния снега и испарение как с его поверхности, так и с поверхности почвы, освободившейся от снега. Ко вторым относятся постоянные характеристики водосборов: размеры, конфигурация бассейна, уклоны его поверхности, рельеф, почвенный состав и растительный покров (залесенность), озерность и заболоченность". Косвенными показателями стокоформирующих факторов, определяющих объем половодья, могут служить те или иные характеристики циркуляции атмосферы, температура поверхности океанов в энергоактивных районах, временные автокорреляционные функции многолетнего ряда наблюдений за объемами половодий и др.

В основу долгосрочных прогнозов и расчетов стока равнинных рек В. М. Мухиным положены 3 основных метода: водно-балансовый, физико-статистический и метод, основанный на математических моделях формирования талого стока на равнинах. Такие модели включают расчет накопления запасов воды в снежном покрове и процесса его таяния, расчет влажности, глубины промерзания почвы, а также процесса стекания воды по одному или нескольким относительным водоупорам.

Важнейшим фактором весеннего половодья, по его мнению, является снежный покров, характеризуемый величиной запасов воды в нем, величиной покрытой им площади (%) и его распределением по территории.

"Другим важнейшим фактором формирования половодья на ре-

ках, – пишет В. М. Мухин, – является водопоглотительная способность почвы, которая зависит от глубины промерзания почвы, ее влажности и температуры, интенсивности поступления талой воды на поверхность почвы, которая, в свою очередь, зависит от дружности весны. Чем медленнее при прочих равных условиях происходит таяние снега, тем больше почва может впитать и профильтровать талой воды, и наоборот".

Глубина промерзания l_i зависит от зимней температуры воздуха и толщины снежного покрова и выражается через сумму средних декадных значений температуры воздуха Θ и высоту снега h по уравнению

$$l_i = f(\sum_{i=1}^{i=n} \alpha i\ (h)\Theta i)\alpha_i(h)\Theta i), \qquad (8)$$

где $\alpha_i = exp(-0{,}39h_i)$; h – толщина снежного покрова, см; Θ – сумма средних декадных значений температуры воздуха; α – коэффициент, зависящий от толщины снежного покрова; i – номер точки бассейна или его части.

Уравнение (8) не может характеризовать глубину промерзания почвы, а тем более нельзя рассчитывать ее. Снег хорошо изолирует почву и состояние ее часто не зависит от температуры воздуха, т. е. при большой сумме отрицательных температур почва может остаться талой и сохранить впитывающую способность на высоком уровне.

Как считает В. И. Мухин, "влажность почвы нередко является более сильным фактором формирования половодья, чем глубина промерзания. На влажность же почвы приходится больший процент потерь стока, так как при переувлажненной почве величина глубины промерзания практически теряет свое влияние на формирование объема половодья при одном и том же запасе воды в снежном покрове. Наибольшее значение для точности гидрологических прогнозов имеют запасы влаги в почве перед началом снеготаяния. Однако наибольшая часть наблюдений за ней проводится на агрометеорологических станциях в зависимости от посевных площадей. В связи с этим гидрологи используют осеннюю влажность почвы и косвенные показатели влагоемкости всего бассейна, приуроченные, как правило, к осеннему периоду".

Учет такого большого количества факторов, одни из которых не

играют существенной роли в формировании стока, а другие (глубина промерзания, влажность почвы и т. д.) рассчитываются по косвенным показателям, приводит к большим ошибкам.

В. М. Мухин также отмечает, что "учесть все факторы, определяющие величину влажности почвы в данный момент для точки, практически невозможно". В связи с этим используются методы расчетов косвенных показателей влажности почвы к осени, а затем производятся вычисления прибавки к ней в период оттепелей по уравнению

$$W = X_n + (X - Z)_k + W_o, \qquad (9)$$

где W – увлажнение почвы; X – осадки; Z – испарение; n – количество суток, за которые суммируются осадки до даты наступления морозов; k – количество суток, за которые вычислена разность между осадками и испарением (обычно 2-4 месяца); W_o – начальное значение увлажнения почвы.

Это приводит к значительному снижению точности прогноза, так как расчеты основаны на косвенных показателях, а не непосредственных определениях влажности почвы.

Он пишет, что "известно довольно большое число способов реализации уравнения водного баланса бассейна реки. Выбор способа зависит от ряда обстоятельств, определяемых наличием тех или иных данных наблюдений, их количеством, длиной их ряда. На выборе способа также сказываются физико-географические условия в бассейне и, в конечном счете, концептуальные оценки исследователя соотношений между факторами стока и степенью их воздействия на элементы половодья".

Для прогноза стока талых вод В. М. Мухин использует следующее уравнение:

$$Y(j) = S(j) - P(j)th[S(j)/P(j)], \qquad (10)$$

где th – гиперболический тангенс; $S(j)$ – запасы воды в снежном покрове на момент составления прогноза в j-м году, равный $\alpha_i S(j)\alpha_2 X(j, k)exp(-\alpha_3 k)$, $X(j, k)$ – количество осадков в k-м отрезке времени, на который разделен период от даты составления прогноза до конца второго

квартала; $P(j)$ – характеристика потерь стока, равная $\alpha_4 exp\{-\alpha_5 W(j)[1 + \alpha_6 L(j)]\}$, $W(j)$ – характеристика влагозапасов в бассейне накануне составления прогноза, $L(j)$ – глубина промерзания почвы, $\alpha_1, \ldots \alpha_6$ – параметры, величины которых определяются путем применения оптимизационных процедур.

В этих подходах применен балансовый метод. Величина стока равна разнице между запасами воды в снеге и потерями ее на впитывание $P(j)$ (объем воды, просочившейся в почву). Самым сложным является определение потерь воды на впитывание. По уравнению (10) они зависят от запасов воды в почве и глубины ее промерзания. При этом, чем больше запасы влаги в почве, тем больше сток, и чем больше глубина промерзания, тем больше сток.

Недостатки подхода Гидрометцентра к расчету стока следующие:

используется очень много факторов, часть из которых не играют существенной роли в формировании стока, но способствуют значительному увеличению ошибки его расчета;

часть факторов стока (глубина промерзания, влажность почвы и др.) рассчитываются по косвенным показателям, а не определяются непосредственно в поле. Например, глубина промерзания определяется по сумме отрицательных температур и высоте снега. Это может приводить к большим ошибкам. Если снежный покров установился на талой почве, то она останется талой, какой бы ни была сумма отрицательных температур. Для расчета стока берется предзимняя влажность почвы и затем делаются расчетным путем поправки на ее изменение в течение зимы за счет оттепелей. Это тоже приводит к большим ошибкам; увлажнение почвы также рассчитывается по косвенным показателям.

Г. П. Калининым и З. С. Дарман (по А. Н. Гельфану [31]) предложено определять величины максимального расхода стока весеннего половодья разной вероятности превышения по уравнению

$$Q_{max} = Q_0 + A\frac{S}{\tau}, \qquad (11)$$

где Q_{max} – максимальный расход стока весеннего половодья, Q_0 – средний расход грунтового питания в весенний период, A – площадь

водосбора, S – максимальные запасы воды в снеге, τ – продолжительность половодья.

Из уравнения (11) видно, что максимальный расход стока весеннего половодья прямо пропорционален запасам воды в снеге и обратно пропорционален продолжительности половодья, т. е. чем снегозапасы больше, тем больше сток, и чем больше продолжительность половодья, тем меньше максимальный расход стока весеннего половодья. Это не так. На самом деле связь стока с запасами воды в снеге более сложная, а с продолжительностью половодья ее совсем нет, что будет показано ниже.

Анализ уравнений (10), (11) прогноза стока талых вод показал, что при разработке прогноза по применяемым в настоящее время методикам либо используется один фактор (например, снегозапасы), либо десяток и более факторов. Ни то, ни другое неприемлемо. Из этих уравнений видно, что сток в основном зависит от снегозапасов, хотя в них и учитывается водопоглотительная способность почвы через глубину промерзания, ее увлажнение и другие факторы, но, судя по коэффициентам, эти показатели либо играют незначительную роль, либо очень большую.

Таким образом, в литературе много данных по влиянию природных факторов на сток талых вод. Однако эти факторы рассматриваются в основном без учета совокупности их влияния. Причем взгляды разных исследователей в значительной степени различаются и даже бывают противоположными. Это объясняется тем, что ими использовались разные подходы, концепции и, главное, разные методы исследований. Все имеющиеся в литературе результаты исследований, обобщения и анализа связи стока талых вод с природными факторами, а также методы его прогнозирования в настоящее время не дают возможности однозначно определить роль тех или иных факторов в формировании стока, дать точный его прогноз и выявить пути его регулирования эрозионно-гидрологических процессов. Нужен новый методический подход к анализу имеющегося материала и получению дополнительных данных.

1.2. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод

1.2.1. Общая характеристика поверхностного стока талых вод с разных сельскохозяйственных угодий

В ФНЦ агроэкологии РАН (бывший ВНИАЛМИ) в результате многолетних (60-68 лет) исследований элементов водного баланса по четырем опытным эрозионным объектам, расположенным в трех географических зонах (лесостепной с серыми почвами, степной с обыкновенными черноземами и каштановыми почвами и сухостепной со светло-каштановыми почвами) получен уникальный материал, позволяющий дать характеристику поверхностного стока талых вод с разных видов пашни и оценку стокорегулирующей роли зяблевой обработки почвы.

Полученные многолетние материалы наблюдений и обобщение литературных данных позволили построить теоретические кривые вероятности превышения стока талых вод на рыхлой и уплотненной пашне, которые хорошо аппроксимируют эмпирические точки исследуемых рядов наблюдений, вычислить показатели стока разной вероятности превышения и стокорегулирующий эффект зяби.

Показатели поверхностного стока талых вод с уплотненной и рыхлой пашни разной вероятности превышения по природным зонам приведены в табл. 1. Они показывают, что на рыхлой пашне поверхностный сток формируется в лесостепи 5-6 лет в десятилетие, а на уплотненной пашне – 7-8 лет из 10-ти 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 уплотненной пашне эти показатели были 7-8 лет из десяти. Величины стока разной вероятности превышения уменьшаются при движении с севера на юг и юго-восток, а разница в стоке на рыхлой и уплотненной пашне увеличивается. Такая тенденция наблюдается и при анализе величин стока по годам. Однако в отдельные годы наблюдается инверсия стока, когда в лесостепной зоне он

не формируется или бывает меньше, чем в степной и полупустынной зонах, где он значительный. Это указывает на то, что на формирование стока мощное воздействие оказывают природные факторы, особенно глубина промерзания, влажность почвы и снегозапасы, которые формируются в разных зонах под влиянием различных климатических условий, изменяющихся по годам. Анализ этих данных показал, что средние величины стока с уплотненной пашни при движении от серых лесных почв (лесостепь) до светло-каштановых почв (сухая степь) снижаются от 30 до 15 мм. На зяби темпы снижения значительно ниже.

Таблица 1

Средние и разной вероятности превышения показатели поверхностного стока талых вод с уплотненной и рыхлой пашни, мм

Зона, область, почва	Вид пашни	Среднее	Вероятность превышения, %							C_v	C_s
			1	5	10	50	70	80	90		
Лесостепная, Орловская, серая лесная	1	30	156	101	78	19	5	0	0	1,27	1,68
	2	20	129	81	59	11	0	0	0	1,52	1,96
Лесостепная, Курская: - темно-серая лесная	1	37	169	115	91	28	12	4	0	1,07	1,45
	2	20	118	74	55	11	2	0	0	1,36	2,07
- выщелоченный чернозем	1	37	192	123	93	20	2	0	0	1,44	1,41
	2	15	98	61	44	6	0	0	0	1,76	1,55
Степная, Воронежская, обыкновенный чернозем	1	32	157	102	78	19	5	0	0	1,30	0,95
	2	9	88	53	38	3	0	0	0	2,40	2,11
Степная, Самарская, обыкновенный чернозем	1	36	124	91	75	30	16	9	0	0,87	0,88
	2	7	54	33	24	3	0	0	0	1,79	2,05
Сухостепная, Волгоградская: - темно-каштановая	1	17	84	55	42	11	5	2	0	1,24	1,72
	2	5	37	21	15	2	0	0	0	1,80	2,31
- светло-каштановая	1	15	75	52	41	12	4	0	0	1,19	1,14
	2	3	38	20	12	0	0	0	0	2,43	3,42

Примечание. Вид пашни: 1 – уплотненная, 2 – рыхлая; C_v – коэффициент вариации, C_s – коэффициент асимметрии.

Ход динамики стока в исследуемые периоды 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 весен-

ним снеготаянием все эти годы в лесостепной и степной зонах Русской равнины была талая или промерзала на небольшую (до 50 см) глубину.

Приведенные материалы дают представление и о водопоглощении. Среднемноголетняя величина инфильтрации (впитывания, водопоглощения) в лесостепи составила на рыхлой пашне 76 мм, на уплотненной – 73 мм, в степи на рыхлой пашне – 118 мм, а на уплотненной – 85 мм, или на 33 мм меньше. В сухой степи эти показатели были соответственно 45 и 40 мм.

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.

Было установлено также, что почва способна поглотить и удержать определенное количество воды, максимальная величина которого в мерзлом состоянии может достигать полной влагоемкости верхнего слоя. На основе сформулированной ранее Е. А. Гаршинёвым [19] концепции ледяной экрана при оттаивании верхнего слоя почвы по границе с мерзлым слоем происходит полное перекрытие всех пор льдом и инфильтрация влаги превращается в процесс "термоинфильтрации" за счет притока тепла извне. Нами установлено, что к концу весеннего снеготаяния мерзлая почва успевает оттаять на глубину не более 30 см (в среднем 15-25 см), который увлажняется до полной влагоемкости, т. е. оттаявший слой почвы поглощает количество воды, обусловленное объемом свободных пор, а остальная вода стекает. Ранее также было установлено, если почва талая или промерзла на глубину не более 50 см, то сток талых вод не формируется. При глубине промерзания ее глубже 50 см сток формируется и величина его зависит от количества воды в снеге и в верхнем (0-30 см) слое почвы.

На этой основе нами разработан новый способ расчета поверхностного стока талых вод при глубине промерзания почвы глубже 50 см. Величина его определяется объемом свободных пор в слое почвы 0-30 см $V_{сп}$ и снегозапасами W_c, и может быть рассчитана по уравнению

$У = W_c - V_{сп}$. Объем свободных пор равен разнице между общей порозностью $V_{оп}$ и запасами воды в почве $W_ф$: $V_{сп} = V_{оп} - W_ф$. Таким образом, величина стока рассчитывается по уравнению: $У = W_c - (V_{оп} - W_ф)$.

1.2.2. Зависимость поверхностного стока талых вод от природных факторов. Закон лимитирующих факторов стока

Анализ многолетних материалов, характеризующих связь поверхностного стока с природными факторами, показал, что прямой зависимости стока от снегозапасов, т. е. больше снега – больше сток, нет. Например, в лесостепи в многоснежные зимы (снегозапасы больше100 мм) стока часто не было или он был очень большим – до 146 мм. В малоснежные зимы (снегозапасы меньше 100 мм) стока в отдельные годы также не было, а в другие он был относительно большим (до 51 мм). Парный корреляционный анализ связи стока со снегозапасами показал отсутствие прямой зависимости его от запасов воды в снеге. Коэффициент корреляции на рыхлой пашне составил 0,13, стандартная ошибка 38,40. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 0,43 и 35,40. Однако это не значит, что от снегозапасов величина стока не зависит. Средняя величина стока в многоснежные и малоснежные годы сильно различается. На рыхлой пашне в многоснежные годы она была 30 мм, а в малоснежные – 11 мм. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 45 и 20 мм, т. е. снегозапасы влияют на сток в значительной степени, но во взаимодействии с другими факторами – влажностью почвы и глубиной ее промерзания. Подобная закономерность и по другим зонам.

Зависимость поверхностного стока от промерзания почвы такова: если почва талая или замерзла на небольшую глубину (не более 50 см), то сток не образуется, При более глубоком промерзании образуется сток разной величины, не зависящий от дальнейшего его увеличения.

Автором [3] были обобщены и проанализированы многолетние собственные и литературные данные, характеризующие связь слоя

стока талых вод с зяби и уплотненной пашни с запасами воды в снеге и почве (в слое 0-50 см) перед снеготаянием, глубиной ее промерзания и продолжительностью снеготаяния на юге ЦРНЗ, в ЦЧО и Поволжье. В результате были определены важнейшие природные факторы стока – снегозапасы, увлажнение и глубина промерзания почвы (интенсивность и продолжительность снеготаяния практически не влияют на величину стока талых вод) и **открыт закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод**.

Суть закона лимитирующих факторов состоит в том, что при некотором (лимитирующем) значении одного из них сток не формируется независимо от уровня других. Определены также максимальные значения факторов, при которых сток не образуется. Например, на юге ЦРНЗ, в ЦЧО и Поволжье, если почва талая или промерзла до глубины не более 50 см, стока не будет независимо от величины ее увлажнения и количества снегозапасов. Дальнейшее увеличение глубины промерзания почвы выше лимитирующей практически не влияет на величину стока, то есть при любой глубине промерзания выше лимитирующей он формируется одинаково при одинаковых уровнях других факторов. Решающее воздействие на него в этом случае оказывают влагозапасы в почве и снеге. При увлажнении верхнего (0-50 см) слоя до 123 мм в ЦРНЗ и 70-95 мм в Нижнем Поволжье сток не формируется независимо от глубины промерзания почвы и снегозапасов (в данном случае лимитирующий фактор – увлажнение почвы). При снегозапасах, не превышающих объем микрорельефа поверхности, сток также не формируется независимо от уровня увлажнения и глубины промерзания почвы.

При уровнях факторов свыше лимитирующих сток всегда формируется. Величина его в этом случае зависит от сочетания уровней факторов. Роль этих факторов неодинакова в разных природных зонах при различном антропогенном воздействии. На юге ЦРНЗ и севере ЦЧО наиболее мощный фактор формирования стока как на зяби, так и на уплотненной пашне – увлажнение почвы, а на уплотненной

пашне – снегозапасы. Такая закономерность объясняется особенностями почвенно-климатических условий формирования стока.

На основе математического анализа результатов исследований разработаны модели формирования стока на разных типах почв (серые лесные, черноземы и каштановые), видах угодий (луг, пашня, залежь) и пашни (зябь, озимые, многолетние травы и др.) (табл. 2).

Таблица 2

Уравнения связи стока талых вод на рыхлой $У_р$ и уплотненной пашне $У_п$ с запасами воды в почве $W_п$ и снеге $W_с$, мм

Зона, область, почва	Рыхлая пашня	Уплотненная пашня
Лесостепь, Орловская, серая лесная	$У_р = -141+0{,}08W_п+0{,}38W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}93$; $M_{ух} = 12{,}4$	$У_п = -16{,}4 - 0{,}15W_п+0{,}34W_с$ $R_{УпWпWс} = 0{,}81$; $M_{ух} = 13{,}3$
Лесостепь, Курская, серая лесная	$У_р = -57+0{,}34W_п+0{,}26W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}61$; $M_{ух} = 26{,}8$	Нет данных
типичный чернозем	$У_р = -50+0{,}25W_п+0{,}25W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}92$; $M_{ух} = 4{,}5$	$У_п = -116+0{,}71W_п+0{,}41W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}74$; $M_{ух} = 16{,}0$
Степь, Воронежская, обыкновенный чернозем	$У_р = -40+0{,}19W_п+0{,}38W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}54$; $M_{ух} = 21{,}5$	$У_п = -12+0{,}06W_п+0{,}69W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}91$; $M_{ух} = 6{,}8$
Степь, Самарская, обыкновенный чернозем	$У_р = -53+0{,}51W_п+0{,}04W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}48$; $M_{ух} = 8{,}4$	$У_п = -24+0{,}17W_п+0{,}40W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}92$; $M_{ух} = 7{,}0$
Сухая степь, Волгоградская, каштановая	$У_р = -27+0{,}38W_п+0{,}29W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}96$; $M_{ух} = 7{,}1$	$У_п = -4+0{,}19W_п+1{,}14W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}92$; $M_{ух} = 9{,}2$
светло-каштановая	$У_р = -5{,}2+0{,}04W_п+0{,}44W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}64$; $M_{ух} = 6{,}3$	$У_п = -21{,}9+0{,}26W_п+0{,}22W_с$ $R_{УрWпWс} = 0{,}84$; $M_{ух} = 13{,}1$

По этим материалам дана методика расчета стока при разных уровнях важнейших лимитирующих его природных факторов с учетом типов почв, видов угодий и пашни.

Было также рассмотрено и оценено влияние хозяйственной деятельности на гидрологические процессы, дана количественная оценка роли антропогенных факторов стока (противоэрозионных мероприятий, обработки почвы, севооборотов, посадки защитных лесных насаждений, создания гидротехнических сооружений, лугомелиорации и др.) на природные факторы и их совместное влияние на формирование стока.

2. МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ТАЛЫХ ВОД В БАССЕЙНАХ ВОЛГИ И ДОНА

2.1. Общие положения

2.1.1. Анализ и обобщение изложенных выше и других материалов позволил нам разработать метод прогноза стока с сельскохозяйственных угодий на водосборных бассейнах с учетом типов почв, видов угодий и состояния пашни. Кратко можно выделить следующие наиболее важные новые результаты, которые нашли применение при разработке методики:

закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод, позволяющий по-новому рассматривать закономерности его формирования;

положение о том, что почва как саморегулирующая система способна поглотить и удержать определенное количество воды, равное дефициту влажности, максимальная величина которого в мерзлом состоянии может достигать полной влагоемкости;

математические модели формирования поверхностного стока талых вод;

концепция формирования "ледяного экрана";

концепция образования сплошной менисковой пленки.

2.1.2. Настоящая методика может применяться проектными, сельско- и водохозяйственными организациями для составления прогноза величины поверхностного стока талых вод с целью установления оптимального режима весеннего паводка и предотвращения чрезвычайных ситуаций.

2.1.3. Настоящая методика позволяет делать прогноз величины (объема) поверхностного стока талых вод как для малых водосборов (лощины, балки) так и для бассейнов малых и крупных рек.

2.1.4. Положения методики основываются на использовании закона лимитирующих факторов стока талых вод, открытого в резуль-

тате анализа 60-68-летних материалов исследований в различных природных зонах европейской части России. Ведущими факторами, влияющими на формирование стока, являются снегозапасы, глубина промерзания и влажность верхнего (0-50 см) слоя почвы.

2.1.5. Для малых водосборов прогноз стока талых вод дается на основе учета ведущих природных факторов, влияющих на его формирование и соотношения площадей, находящихся под зябью и уплотненной пашней (озимые, многолетние травы, залежь и др.).

2.1.6. Для расчета стока на бассейнах рек также учитываются эти природные факторы, а соотношение площадей под зябью и уплотненной пашней определяется по регионам в пределах водосборов рек.

2.1.7. Положения настоящей методики основаны на оригинальном подходе и по ним можно давать высокоточный (80-100%) прогноз величины поверхностного стока талых вод. Если почва талая, то точность прогноза 100%, а при глубине ее промерзания свыше 50 см точность прогноза зависит от точности определения запасов воды в снеге и почве и составляет 80-90%.

2.2. Краткая методика определения исходных показателей, необходимых для прогнозирования стока

2.2.1. Для расчета величины поверхностного стока талых вод необходимы следующие характеристики:

- запасы воды в снеге, мм;
- глубина промерзания почвы, см;
- запасы воды в слое почвы 0-50 см, мм;
- общая площадь водосбора, га;
- площадь рыхлой пашни на водосборе, га;
- площадь уплотненной пашни (озимые, многолетние травы, залежь) на водосборе га;
- площадь лесных угодий.

2.2.2. Запасы воды в снеге определяются по данным наблюдений

Гидрометслужбы на метеостанциях и постах, на основе аэрокосмического мониторинга и уточняются в результате проведения снегомерных съемок на водосборах.

Формирование снежного покрова происходит под влиянием таких факторов, как ветер, расчлененность территории, экспозиция, крутизна и протяженность склонов, вид угодий, наличие защитных лесных насаждений и др. Снегомерные съемки, проводимые на водосборах, имеют целью определить влагозапасы в снеге на всех водосборах, установить закономерность и особенности снегораспределения на разных угодьях в зависимости от рельефа и экспозиции склонов, выявить снегонакопительную и снегораспределительную роль защитных лесных полос и других насаждений.

На водосборах проводят разовые снегомерные съемки за 20-30 дней до снеготаяния по заранее намеченным постоянным маршрутам, которые наносят на план водосбора, нумеруются и закрепляются в натуре.

На простых водосборах с одним видом угодий (выгон, пашня, сад, лес и др.) намечается 3 маршрута поперек склона на одном расстоянии друг от друга, причем суммарное расстояние между крайними маршрутами в верхней и нижней границами водосбора должно составлять 2/3 расстояния между соседними маршрутами. Они пересекают водосбор от одного до другого водораздела. Здесь преобладают маршруты прямолинейного направления. Общая протяженность всех маршрутов близка к 3-5-кратной средней ширине водосбора. На больших комплексных опытных водосборах число маршрутов может доходить до 5-6, причем они должны располагаться как поперек водосбора, так и вдоль него с охватом всех основных угодий, лесных полос и других элементов, сильно влияющих на снегораспределение. Измерения в маршрутах проводятся в точках, расположенных через 5-25 м. Плотность снега на каждом угодье измеряется весовым снегомером ВС-43 в 5 точках и, кроме того, в пунктах с характерным залеганием снега. На водосборе с лесополосами снегомерные маршруты должны проходить

перпендикулярно к направлениям полосы.

Средний запас воды в снеге (мм) на каждом виде угодий определяется путем перемножения его средней высоты (в мм) и средней плотности (в г/см^3). На всем комплексном водосборе запас воды в снеге (X) определяется как средневзвешенная величина через площадь отдельных угодий Si и всю площадь S:

$$X = \frac{\sum X \cdot Si}{S} \qquad (15)$$

Осадки, выпавшие в период после проведения снегомерной съемки до снеготаяния добавляют к запасам воды в снеге.

2.2.3. Глубина промерзания почвы определяется в те же сроки, что и снегозапасы. При этом применяется копка шурфов в мерзлой земле, бурение и другие способы. Основным признаком мерзлой почвы является наличие в ней кристалликов льда и механическое сопротивление при разломе и разминании кусочков почвы и ее влажность. Динамику промерзания и оттаивания почвы изучают также при помощи мерзлотомера Данилина МД-2, проводя наблюдения три раза в месяц. Одновременно производят замеры высоты снежного покрова. Следует иметь в виду, что МД-2 фактически показывает глубину проникновения отрицательных температур и поэтому преувеличивает показатели глубины промерзания почвы, а в весенний период занижает скорость ее оттаивания снизу и сверху. Поэтому указанный метод определения промерзания почвы нужно применять в сочетании с другими методами.

Для оценки глубины промерзания почвы можно использовать данные Гидрометслужбы, но только те, которые определялись по кристалликам льда непосредственным бурением почвы на различных видах угодий водосборов. Почва бывает талая или глубоко промерзает обычно на больших территориях, охватывающих сотни и тысячи квадратных километров. Важно определить границу между талой и глубоко промерзшей почвой, если она не выходит за пределы исследуемого водосбора.

2.2.4. Влажность мерзлой почвы определяется в 3-кратной по-

вторности до глубины 50 см. Образцы берутся со следующих глубин: 0, 10, 20, 30, 40 и 50 см. Влажность почвы выражается в процентах, а запасы влаги – в миллиметрах послойно и суммарно для всей толщи. Запасы влаги вычисляют по формуле Н. А. Качинского

$$W = \frac{M \cdot V \cdot K}{10} \qquad (16)$$

где M – мощность слоя почвы, см; V – общая темная масса почвы, г/см^3; К – влажность данного слоя почвы, %.

Объемная масса почвы определяется путем отбора образцов с ненарушенным сложением с различных глубин (0, 10, 20, 30, 40, 50 см) при помощи прибора Качинского в 3-кратной повторности с последующим высушиванием и взвешиванием.

Если почва на водосборе талая или промерзла на глубину до 50 см, то запасы воды в почве можно не определять.

2.2.6. Площадь малых водосборов определяется по топографическим планам масштаба 1:10000 – 1:25000, а бассейнов рек 1:50000-1:1000000.

2.2.7. Площадь территории, занятой уплотненной пашней и зябью на малых водосборах определяется на основе статистических данных муниципальных образований, а для бассейнов рек – региональных, а затем они суммируются по водосбору реки.

2.3. Методика прогноза величины (объема) поверхностного стока талых вод на водосборных бассейнах

2.3.1. Алгоритм прогноза поверхностного стока талых вод в зависимости от уровня природных факторов приведен в табл. 3.

2.3.2. Сначала анализируются данные по глубине промерзания почвы на водосборе. Если почва талая или промерзла на глубину до 50 см, то поверхностный сток талых вод на сельскохозяйственных и лесных угодьях не сформируется. Если почва промерзла на глубину свыше 50 см, то сток сформируется обязательно и величина его будет зависеть от запасов воды в снеге и почве (в слое 0-50 см). Уровень глубины про-

мерзания почвы свыше лимитирующего на величину стока не влияет.

Таблица 3

Алгоритм прогноза поверхностного стока талых вод в зависимости от уровня природных факторов

Уровень факторов			Характер формирования стока
Глубина промерзания почвы, см	Запас воды в почве (слой 0-50 см), мм	Снегозапасы, мм	
Меньше 50	Любой	Любой	Сток не формируется
Больше 50	Меньше 70-120 (по зонам)	Любой	Сток не формируется
	Больше 70-120 (по зонам)	Меньше объема микрорельефа	Сток не формируется
			Сток формируется, величина его зависит от уровня запасов воды в снеге и почве

2.3.3. При глубине промерзания почвы свыше 50 см анализируются данные по запасам влаги в верхнем (0-50 см) слое почвы. Если они в лесостепной зоне ниже 120 мм, а в степной и полупустынной зонах ниже 70 мм, то сток не формируется. Затем анализируются запасы воды в снеге. Если они меньше объема микрорельефа поверхности водосбора, то сток не формируется.

2.3.4. При уровнях факторов выше лимитирующих, т. е. при глубине промерзания почвы свыше 50 см, запасах влаги в слое почвы 0-50 см выше 70-120 мм (по зонам), а в снеге – выше емкости микрорельефа сток сформируется и величина (объем) его будет зависеть только от запасов воды в снеге и почве. При этих условиях величина поверхностного стока талых вод с водосбора ($У$, мм) рассчитывается по выражению

$$У = (\sum_{1}^{n} У_i \cdot S_i / \sum_{1}^{n} S_i) - У_{пэм}, \qquad (17)$$

где $У_i$ – сток с i-го агрофона, мм, рассчитывается по уравнениям (см. табл. 2); S_i – площадь i-того агрофона, га; $У_{пэм}$ – стокорегулирующий эффект от применения системы противоэрозионных мероприятий: противоэрозионная организация территории, лесомелиоративные, агротехнические и гидротехнические приемы, мм (этот параметр применяется только в том случае, если на водосборе осуществлена пол-

ная система мероприятий).

2.3.5. В связи с тем, что в настоящее время нет многолетних экспериментальных данных, характеризующих влияние природных факторов на формирование поверхностного стока в лесной зоне на дерново-подзолистых и других почвах, для расчета стока в бассейнах верхней Волги, Вятки и Камы можно использовать уравнения, рекомендованные для серых лесных почв лесостепной зоны. Это допущение приведет к снижению точности, но не в сильной степени. В будущем необходимо провести экспериментальные исследования в этой зоне и получить научно обоснованные уравнения.

2.3.6. Область применения разработки. Настоящая методика, включающая обоснование состава природных факторов поверхностного стока талых вод, будет применяться для составления прогноза величины поверхностного стока талых вод с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций, возникающих при затоплении сельхозтерриторий; пропуска паводка через Волжско-Камский каскад; проектными, сельскохозяйственными и водохозяйственными организациями.

2.4. Практическая реализация методики

Для практической реализации методики прогноза поверхностного стока в бассейнах Волги и Дона необходимо проводить мониторинг за природными факторами, влияющими на формирование стока. В настоящее время проводятся наблюдения за снегозапасами, глубиной промерзания и влажностью почвы на метеостанциях и постах гидрометслужбы, в ряде научно-исследовательских институтов Они работают по разным методикам и получают разные по качеству материалы. Необходимо скоординировать их работу и выработать единую методику сбора материала.

Для более широкого охвата территории бассейнов Волги и Дона наблюдениями за природными факторами стока потребуется дополнительно проводить их в следующих пунктах:

- в Волжско-Камском бассейне – Саратов, Казань, Нижний Новгород, Рыбинск, Ижевск, Пермь, Уфа, Киров;

- в Донском бассейне – Ростов, Ст. Оскол, Воронеж (можно в Каменной степи), Липецк, Тула.

Кроме того, в Камском бассейне и в верховьях Волги (лесная зона) необходимо проводить исследования по оценке влияния природных факторов на формирование поверхностного стока с целью выявления закономерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сурмач Г. П. Водная эрозия и борьба с ней. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 254 с.

2. Львович М. И. Человек и воды. – М.: Географиздат, 1963. – 567 с.

3. Барабанов А. Т. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод, его прогноз и регулирование // Изв. Оренбург. аграр. ун-та. – 2012. – № 1(33). – С. 65-68.

4. Басов Г. Ф., Грищенко М. Н. Гидрологическая роль лесных полос. – М.: Гослесбумиздат, 1963. – 201 с.

5. Небольсин С. И., Надев П. А. Элементарный поверхностный сток. – М. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1937. – 64 с.

6. Сухарев И. П., Сухарева Е. М. Пруды Центрально-Черноземной полосы. – Воронеж: Воронежское кн. изд-во, 1957. – 213 с.

7. Чеботарев А. И., Харченко С. И. О влиянии зяблевой вспашки на сток // Труды ГГИ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – Вып. 82. – С. 34-49.

8. Сурмач Г. П. Прогнозирование стока талых вод с черноземных и каштановых почв // Вестник с.-х. науки. – 1969. – № 12. – С. 53-56.

9. Полуэктов Е. В. Эрозия почв на Дону и меры борьбы с ней. – Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета, 1984. – 161 с.

10. Полуэктов Е. В., Балакай Н. И., Балакай Г. Т. Система мероприятий по снижению поверхностного стока и водной эрозии на землях сельскохозяйственного назначения // Мелиорация и гидротехника. – 2010. – № 4. – С. 103-107.

11. Комплексные исследования состояния и почвозащитные мероприятия на агроландшафтах / Е. В. Полуэктов [и др.] // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2013. – № 4(12). – С. 1-14.

12. Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 420 с.

13. Комаров В. Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. – М: Гидрометеоиздат, 1959. – 295 с.

14. Комаров В. Д., Макарова Т. Т. Исследование влияния глубины промерзания почвы и других факторов на талый сток рек степной и лесостепной зон // Метеорология и гидрология. – 1972. – № 8. – С. 67-74.

15. Теплофизический метод расчета потерь талых вод на инфильтрацию в мерзлую почву / И. Л. Калюжный [и др.] // Метеорология и гидрология. – 1981. – № 1. – С. 76-82.

16. Мотовилов Ю. Г. Численное моделирование процесса инфильтрации воды в мерзлую почву // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 9. – С. 67-75.

17. Кучмент Л. С. Модели процессов формирования речного стока. – Л: Гидрометеоиздат, 1980. – 143 с.

18. Калюжный И. Л., Павлова К. К., Лавров С. А. Физическое моделирование процессов миграции влаги при промерзании почв // Метеорология и гидрология. – 1984. – № 1. – С. 71-85.

19. Гаршинёв Е. А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: Теория и модели. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. – 196 с.

20. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги / Н. И. Алексеевский [и др.] // Вода: химия и экология. – 2013. – № 4. – С. 3-12.

21. Демидов В. В. Закономерности эрозии почв лесостепной зоны при снеготаянии как научная основа системы почвозащитных и природоохранных мероприятий: автореф. дис. … д. б. н. – М., 2000. – 47 с.

22. Сурмач Г. П., Ломакин М. М., Шестакова А. П. Прогнозирование стока талых вод // Земледелие. – 1989. – № 4. – С. 29-31.

23. Водогрецкий В. Е., Зайцева Э. А., Елфимова Л. В. Склоновый сток и его изменение под влиянием агротехнических и лесомелиоративных мероприятий // Вопросы влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим: тр. ГГИ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – Вып. 206. – С. 53-60.

24. Гаршинёв Е. А. О влиянии уклона на поверхностный сток // Науч. тр. ВАСХНИЛ. – М.: Колос, 1977. – С. 56-65.

25. Шеппель П. А. Специальный весенний попуск паводковых вод Волги. – Волгоград: Нижне-Волжское кн. изд-во, 1990. – 191 с.

26. 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.

27. Урбанова О. Н., Семанов Д. А. Методика расчета наполнения прудов для прогнозирования безопасного пропуска весеннего половодья // Там же. – № 4. – С. 144-148.

28. 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.

29. Гагаринова О. В. Ландшафтно-гидрологические закономерности формирования стока в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. – 2012. – № 3. – С. 55-60.

30. Мухин В. М. Методы прогнозирования притока воды в водохранилища за период весеннего половодья // Труды Гидрометцентра России. Гидрометеорологические прогнозы. – 2014. – Вып. 351. – С. 108-140.

31. Гельфан А. Н. Динамико-статистическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 280 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение…… 3
1. **Закономерности формирования поверхностного стока. Количественная связь между стоком и природными факторами**……. 5
1.1. Анализ материалов по оценке связи поверхностного стока с природными факторами…… 5
1.2. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод, его характеристика и расчет…… 20
1.2.1. Общая характеристика поверхностного стока талых вод с разных сельскохозяйственных угодий …….. 20
1.2.2. Оценка влияния характера использования пашни на формирование стока талых вод…….. 23
2. **Методика прогноза поверхностного стока талых вод в бассейнах Волги и Дона** ……..... 26
2.1. Общие положения…… 26
2.2. Краткая методика определения исходных показателей, необходимых для прогнозирования стока ……... 27
2.3. Методика прогноза величины (объема) поверхностного стока талых вод на водосборных бассейнах…….. 30
2.4. Практическая реализация методики……... 32
Литература…….. 34

Барабанов Анатолий Тимофеевич

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ТАЛЫХ ВОД
В БАССЕЙНАХ ВОЛГИ И ДОНА

Текст выполнен автором без участия научного и литературного редакторов.
Компьютерная верстка В. Г. Гирявенко

Подписано в печать 10.09.2019.
Объем 1,8 уч.-изд. л. Заказ 9.
Тираж 300 экз. (первый завод 100 экз.)

400062, Волгоград, Университетский проспект, 97.
Копировально-множительное бюро ФНЦ агроэкологии РАН