Научный журнал https://sibran.ru/journals/GIPR/

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 634.0.6:634.0.266 DOI: 10.15372/GIPR20240311

А.Т. БАРАБАНОВ

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 400062, Волгоград, Университетский пр., 97, Россия, a.barabanov2011@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕСЕННЕГО СКЛОНОВОГО СТОКА НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ ЛЕСОСТЕПНОЙ И СТЕПНОЙ ЗОН ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Анализ и обобщение многолетних экспериментальных данных позволили сформулировать важные теоретические и практические выводы. Выявлен генезис процесса формирования стока и дано его теоретическое обоснование. Открыта закономерность, которая заключается в том, что существенное влияние на весенний склоновый сток оказывают только три природных фактора: снегозапасы, промерзание и степень увлажнения почвы. При их некоторых (лимитирующих) уровнях (глубина промерзания меньше 50 см, запасы влаги в слое почвы 0–50 см меньше 70–120 мм по зонам и снегозапасы меньше объема свободных пор в слое почвы 0–30 см) сток не образуется. Если же показатели уровней каждого из этих факторов выше лимитирующих, то сток обязательно формируется и величина (слой) его от глубины промерзания не зависит, так как впитывание происходит только в слое от 3 до 30 см (колеблется по зонам и годам), потому что в нем образуется водонепроницаемый ледяной экран, ниже которого снеговая вода не поступает. Объем стока зависит от свободной порозности в этом слое почвы и снегозапасов, а она, в свою очередь, — от степени увлажнения почвы. Величина стока при глубоком промерзании почвы коррелирует с ее влажностью и снегозапасами перед снеготаянием. Эти факторы являются основными при формировании условий стокообразования. Главную роль при этом играет влажность почвы, а снегозапасы — пассивную. Величина стока зависит от снегозапасов, но они непосредственно не воздействуют на водопоглощение, т. е. часть снеговой воды после заполнения свободных пор стекает, и чем ее больше в снеге, тем больше сток. Знание генезиса взаимодействия талой воды с мерзлой почвой позволяет подойти к прогнозированию склонового стока талых вод на генетической основе.

Ключевые слова: *влажность почвы, порозность почвы, глубина промерзания, снегозапасы, водопоглощение, ледяной экран.*

A.T. BARABANOV

Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, Universitetskii pr., 97, Russia, a.barabanov2011@yandex.ru

FORMATION OF SPRING OVERLAND RUNOFF ON AGRICULTURAL LANDS OF THE FOREST-STEPPE AND STEPPE ZONES IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

By analyzing and integrating long-term experimental data, it was possible to formulate important theoretical and practical conclusions. The genesis of the process of flow formation is revealed and its theoretical justification is given. A pattern has been discovered, which implies that only three natural factors have a significant impact on spring overland runoff: snow reserves, freezing and the degree of soil moisture. At their certain (limiting) levels (freezing depth is less than 50 cm, moisture reserves in the soil layer of 0–50 cm are less than 70–120 mm in the zones, and snow reserves are less than the volume of free pores in the 0–30 cm soil layer), runoff is not formed. If the indicators of the levels of each of these factors are higher than the limiting ones, then the runoff is necessarily formed, and its size (layer) does not depend on the depth of freezing, as absorption occurs only in a layer from 3 to 30 cm (varying by zones and years), because a waterproof ice screen is formed in it, below which snow water

© 2024 Барабанов А.Т.

does not arrive. The amount of runoff depends on the free porosity in this layer of soil and snow reserves. Free porosity, in turn, depends on the degree of soil moisture. The amount of runoff during deep freezing of the soil depends on its humidity and snow reserves before snowmelt. These factors are the main ones in the emergence of runoff formation conditions. The main role is played by soil moisture. Snow reserves play a passive role in the formation of runoff. Its value depends on snow reserves, but they do not directly affect water absorption, that is, part of the snow water drains after filling the free pores, and the more it is in the snow, the more it will drain. Knowledge of the genesis of the interaction of meltwater with frozen soil allows us to approach the prediction of the overland runoff of meltwater on a genetic basis.

Keywords: *soil moisture, soil porosity, freezing depth, snow reserves, water absorption, ice screen.*

ВВЕДЕНИЕ

Защита почв от эрозии должна строиться на адаптивно-ландшафтном принципе с учетом закономерностей формирования склонового стока на водосборах. Важно знать особенности гидрологического процесса при разном характере сельскохозяйственной деятельности. Проблема формирования весеннего поверхностного стока на сельскохозяйственных землях очень актуальна, и ее решение должно быть основано на знании взаимодействия снеговой воды с талой и мерзлой почвой. Данная работа основывается на ландшафтных принципах В.В. Докучаева в области борьбы с засухой и А.С. Козменко в области борьбы с эрозией почв [1]. Они считали важнейшим условием повышения продуктивности земель восстановление гидрологического режима территории путем комплексного управления эрозионно-гидрологическим процессом на водосборах [2, 3]. Эти принципы совершенствовались многими поколениями ученых и стали основой современного земледелия. Важно отметить, что главным, как в аспекте борьбы с засухами и суховеями по В.В. Докучаеву, так и в плане борьбы с эрозией почв по А.С. Козменко, является регулирование современного и восстановление девственного водного режима в условиях сельскохозяйственной деятельности. Для этого необходимо знание закономерностей формирования склонового стока.

В результате многолетних исследований учеными выявлено много природных факторов, от которых зависит поверхностный сток. Осуществлен ряд важных теоретических работ, разработаны противоэрозионные мероприятия и приемы. Многие из последних (особенно агротехнические), разработанные на эмпирической основе без теоретического обоснования и оценки их стокорегулирующей роли, оказались малоэффективны [1, 4].

Для познания закономерности процесса стокообразования необходимо знать связь его с природными факторами. Анализ существующих моделей, характеризующих эту связь, показал, что большинство авторов рассматривают формирование стока в период снеготаяния как сложное многофакторное явление.

В уравнениях его расчета обычно используется много факторов. Их роль у разных авторов сильно различается [5–14]. Это связано с использованием разных методических подходов. Многие считают, что способность мерзлых почв впитывать воду и, соответственно, снижать сток зависит от их влажности. Они полагают, что при уровне увлажнения около наименьшей влагоемкости инфильтрационная способность почвы высокая. Поэтому их исследования были направлены на выявление связи водопроницаемости почвы с ее увлажнением, а в связи с этим и стока, с влажностью мерзлой почвы. Причем исследователи для определения влажности нередко брали образцы почвы на разной глубине (до 100, 150 см или до глубины промерзания), в различные сроки (осенью перед морозами, весной перед снеготаянием), а это в значительной степени влияет на точность расчета. Некоторые авторы отдают предпочтение только одному фактору влияния на формирование стока — снегозапасам [5, 12], другие используют много факторов [9–11, 15]. При оценке роли стокоформирующих факторов часто не учитывается взаимодействие их влияния. Поэтому трудно получить однозначный ответ на вопрос об их стокорегулирующей роли.

Цель исследования — выявление характера взаимодействия талой воды с мерзлой почвой и исследование генезиса формирования стока на сельскохозяйственных землях при глубоком промерзании почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на стоково-эрозионных стационарах Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН с применением метода стоковых площадок в лесостепной зоне на серой лесной почве Орловской области и в степной — на обыкновенном черноземе Самарской области и светло-каштановой почве Волгоградской области.

Используемые методы исследования основываются на известных апробированных многими учеными методических подходах, применяемых в гидрологии, почвоведении, земледелии, противоэрозионной мелиорации и др. Основным из них был балансовый метод — метод стоковых площадок, широко применяемый в гидрологии. Методы, заимствованные из других наук, позволяли нам определять показатели и параметры, на которые воздействуют гидрологические процессы: состояние почвы, ее структура, эродированность, гранулометрический состав, порозность, хозяйственное использование и др.

Они позволяют исследовать гидрологические процессы дифференцированно на разных агрофонах, при различных севооборотах, сельхозкультурах, обработке почвы и др. Это очень важно ввиду больших различий в величине стока для разных видов пашни и агрофонов, что необходимо учитывать при прогнозировании и принятии управленческих решений.

С этой целью на стоковых площадках определяли ряд различных показателей, позволяющих характеризовать состояние почвы (влажность, объемная и удельная масса, порозность, глубина промерзания и характер оттаивания), а также замеряли гидрометеорологические (осадки, температура, влажность воздуха, состояние погоды) и многие другие показатели. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом путем бурения скважин в 3-кратной повторности перед уходом в зиму, перед снеготаянием и после снеготаяния. Характер и динамику снегоотложения и снеготаяния определяли путем проведения снегомерных съемок по профилям. Замеры высоты снега делали снегомерной рейкой через 4 м в 3—5-кратной повторности, а плотность снега определяли весовым снегомером через 20 м в 2-кратной повторности. Сток учитывали на треугольных водосливах с углом выреза 45° через каждый час. Глубину промерзания почвы определяли путем бурения скважин и шурфования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ обширного многолетнего (около 70 лет) экспериментального материала по влиянию природных факторов на сток талых вод в зональном разрезе от серых лесных до светло-каштановых почв позволил из многообразия факторов выявить важнейшие: снегозапасы, увлажнение мерзлой почвы и глубина ее промерзания. В результате был сформулирован и апробирован закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод [4]. Его суть заключается в том, что при некотором (лимитирующем) значении любого из этих факторов сток не формируется независимо от уровня других.

Экспериментально установлено, что при уровнях факторов ниже лимитирующих (глубина промерзания <50 см или запасы влаги в слое почвы 0—50 см <70 мм в степной и <120 мм в лесостепной зоне, или снегозапасы меньше объема свободных пор в слое почвы 0—30 см) сток не формируется, т. е. выявлен генезис процесса и дано его теоретическое обоснование [1]. Это позволяет разрабатывать высокоэффективные мероприятия по управлению эрозионно-гидрологическим процессом (ЭГП), воздействуя на данные факторы.

Если же величина любого из этих факторов больше лимитирующих уровней приведенных выше показателей, то сток обязательно формируется на всех видах угодий, и его величина (слой) зависит только от запасов воды в почве и снеге. Глубина промерзания почвы в этом случае не играет никакой роли в формировании стока. В ходе исследования были разработаны статистические модели стока для условий, при которых уровни природных факторов выше лимитирующих [1]. В общем виде связь стока со снегозапасами и запасами воды в почве выражается следующим уравнением:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2,$$

где x_1 — снегозапасы; x_2 — запасы воды в почве; a, b_1, b_2 — коэффициенты регрессии [1]. Таким образом, процесс образования стока приходит к двухфакторному уравнению связи, а фактически — к однофакторному, так как на впитывающую способность мерзлой почвы влияет только ее влажность.

Учитывая, что величина стока — это разница между снегозапасами и объемом впитывания, который зависит от объема свободных пор, можно утверждать, что водопоглощение мерзлой почвой полностью обусловлено ее увлажнением, точнее, дефицитом влажности.

На процесс впитывания влияют свободные поры, объем которых зависит от запасов воды в почве перед снеготаянием. Чем больше в почве влаги, тем меньше в ней свободных пор. Соответственно, почва впитывает меньше снеговой воды, и ее больше стекает по поверхности склона. Итак, на формирование стока полностью влияет впитывающая способность почвы. А снегозапасы, накопленные к периоду снеготаяния, просто представляют собой источник (резервуар) воды, необходимой для впитывания и стока. На процесс впитывания они не влияют, а величина стока от них зависит: при

одном и том же объеме свободных пор стечет воды больше, если больше снегозапасы. Иными словами, снегозапасы активно не воздействуют на водопоглощение, они играют пассивную роль, т. е. процесс формирования стока от них не зависит, стекает часть не впитавшейся в почву снеговой воды.

Расчет стока по этим статистическим моделям для лесостепи дает относительно хорошую сходимость расчетных и экспериментальных результатов, а для степи, особенно сухой, она недостаточная, так как в этих зонах сток формируется реже и ряды наблюдений со стоком короче, что мало для статистического анализа. Поэтому для понимания генезиса процесса впитывания талой воды в мерзлую почву нужно наряду со статистическим применять генетический подход к планированию исследований и анализу их результатов. Ряд ученых [16–21] исследовали процесс впитывания талой воды в мерзлую почву с позиций теплообмена между ними. В.Д. Комаров и Т.Т. Макарова [16, 17] первыми рассмотрели процесс теплофизического взаимодействия талой воды с мерзлой почвой. Их работа, а также дальнейшие исследования процессов замерзания и оттаивания почв другими авторами [18, 19–21] позволили получить новые знания о процессе впитывания талой воды в мерзлую почву. И.Л. Калюжный с соавторами [18, 19] разработали концепцию формирования в мерзлой почве запирающего слоя. По данным авторов, «для образования водонепроницаемого слоя требуется определенное количество просочившейся талой воды. Этот объем численно равен сумме объемов свободных пор в водонепроницаемом слое и во всех слоях, лежащих выше него» [18, с. 385]. Представляет интерес тезис о том, что в почву может впитаться количество воды, равное объему свободных пор в этих слоях.

Отмечая важность концепции запирающего слоя, следует отметить, что результаты проведенных в соответствии с ней расчетов не всегда согласуются с экспериментальными данными Нижнедевицкой стоковой станции [18], которые анализируют авторы. Зафиксированы случаи формирования большого стока при отсутствии запирающего слоя, а также большие различия в стоке при близких по значению его мощностях. Также авторы представляют, что в процессе взаимодействия талой воды с мерзлой почвой участвуют свободные поры всего запирающего слоя и слоя оттаявшей почвы, расположенного выше него.

Е.А. Гаршинёв [20] обстоятельно изучил процесс поглощения талой снеговой воды глубоко промерзшей почвы и создал концепцию «ледяного экрана», образующегося в виде водонепроницаемой ледяной прослойки на границе оттаявшего сверху слоя почвы и мерзлого нижнего слоя. Он образуется в результате термоинфильтрации — протаивания почвы и заполнения свободных пор водой. Этот процесс динамичный. При дальнейшем оттаивании почвы по мере дополнительного поступления талой воды ледяной экран оттаивает и образуется ниже, и снова свободные поры заполняются водой. То есть по мере протаивания почвы и снижения уровня ледяного экрана поровое пространство над ним заполняется поступающей талой водой до уровня полной влагоемкости. Образование ледяного экрана в Западной Сибири отмечается в исследованиях А.А. Танасиенко с соавторами [21]. Мы в своих исследованиях также часто отмечали наличие ледяного экрана в верхнем слое почвы. Иными словами, в процессе водопоглощения участвует только верхний слой почвы выше ледяного экрана.

Эти концепции в основном согласуются между собой, однако между ними имеются и принципиальные различия в понимании и трактовке их значения в образовании стока. Главное отличие в следующем. Согласно концепции Е.А. Гаршинёва, ледяной экран образуется в результате термоинфильтрации — протаивания почвы путем ее теплообмена за счет притока тепла извне в верхний слой почвы, в ходе которого свободные поры заполняются водой. Это происходит в верхнем (до 30 см) слое почвы. Таким образом, поглощение снеговой воды мерзлой почвой происходит в самом верхнем слое. Ледяной экран определяет скорость термоинфильтрации, от которой зависит формирование стока. Если она превышает скорость заполнения пор влагой, то сток не формируется, и наоборот.

По мнению И.Л. Калюжного, К.К. Павловой и С.А. Лаврова [18, 19], количество усвоенной влаги определяет запирающий слой и расположенный выше него, т. е. в почву может впитаться количество воды, равное объему свободных пор в этих слоях. Иными словами, на впитывание работает весь запирающий слой и вышележащие слои. Согласно концепции этих авторов, мощность запирающего слоя зависит от мощности мерзлого (т. е. от запаса холода). По их данным, «мощность возможного запирающего слоя от 10 до 100 см» [18, с. 379]. Известно [1, 4, 8, 22], что глубина промерзания почвы свыше 50–60 см на величину стока не влияет. В этом основные различия данных теорий.

Таким образом, концепции о «запирающем слое» и «ледяном экране» сыграли важную роль в понимании процесса инфильтрации талой воды в мерзлую почву, однако однозначного ответа на этот вопрос пока нет.

Автором настоящей статьи ранее было установлено [1, 4], что поглощение талой воды мерзлой почвой определяется объемом свободных пор в верхнем слое почвы, который успевает оттаять за весь период снеготаяния и склонового стока. Многолетние исследования [1, 20] показали, что за весь этот период почва оттаивает сверху не более чем на 30 см. По годам и по природным зонам этот показатель изменяется от 3 до 30 см.

Таким образом, при глубоком промерзании почвы (более 50 см) и больших влагозапасах в почве и снеге сток всегда формируется. Его объем зависит от снегозапасов и объема свободных пор в верхнем слое (0—30 см) почвы, который, в свою очередь, зависит от исходных запасов влаги в этом слое.

На рисунке приведена схема инфильтрации воды в мерзлую почву. Перед снеготаянием часть пор в почве свободна, а остальные заняты водой. После начала снеготаяния талая вода, имеющая некоторый запас тепла, при поступлении в почву способствует ее оттаиванию, заполнению свободных пор, а затем формированию ледяного экрана между оттаявшим и мерзлым слоями при определенном соотношении температуры воды и мерзлой почвы. При дополнительном поступлении влаги в почву этот процесс продолжается, и ледяной экран образуется ниже. Количество воды, просочившейся в этот слой, равно объему свободных пор, а часть снеговой воды, превышающая данный объем, стекает, т. е. из них формируется поверхностный сток талых вод. Иначе говоря, общая величина просочившейся в почву воды определяется свободной порозностью небольшого оттаявшего самого верхнего слоя.

Опираясь на изложенные выше положения, нами разработан совершенно новый (получен патент на изобретение [23]) способ расчета стока (Y, мм) на сельскохозяйственных угодьях. Главная новизна этого способа состоит в том, что необходимые для расчета показатели (глубина промерзания почвы, запасы воды в снеге и почве, общая и свободная порозность, удельная и объемная масса почвы) определяются только в слое до 30 см, так как известно, что только в этом слое происходит процесс впитывания (термоинфильтрации). Вовлечение в расчет стока более глубоких слоев почвогрунта только увеличивает ошибку расчета.

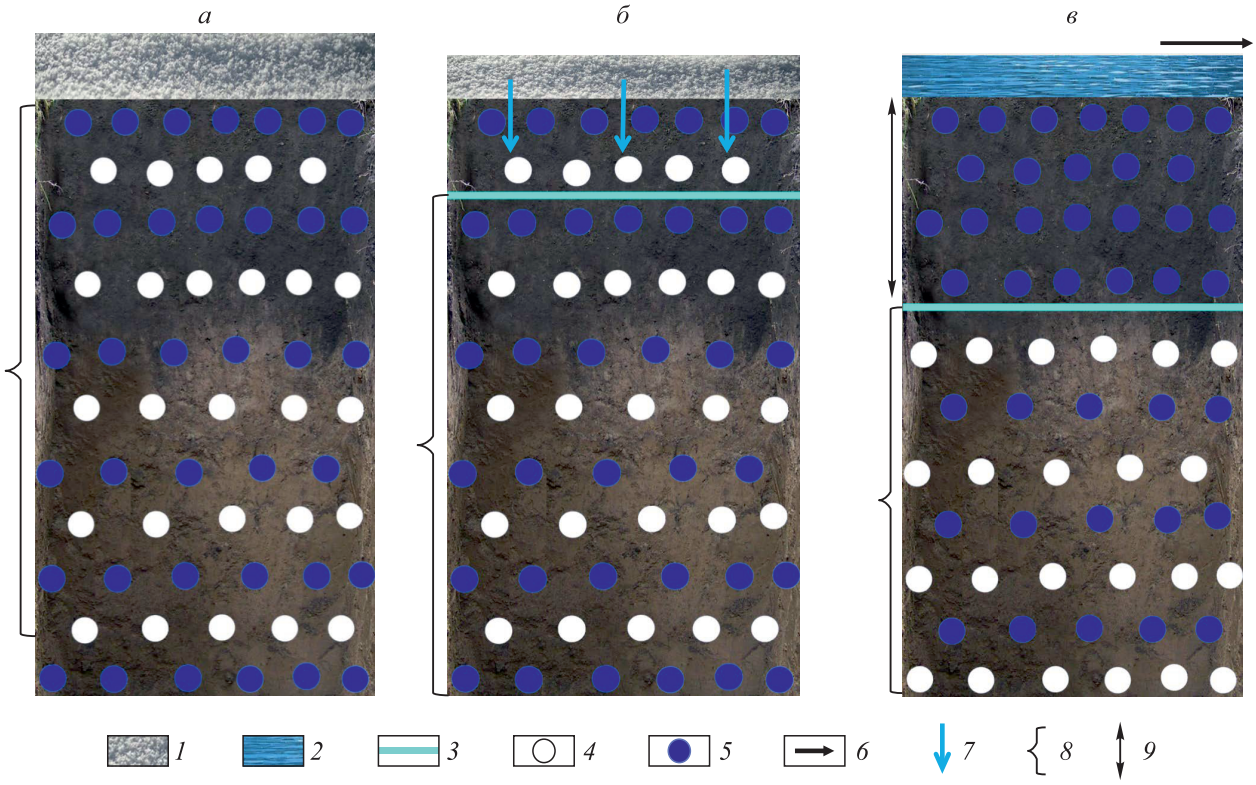

Схема поглощения (термоинфильтрации) талой воды в мерзлую почву в исходном состоянии перед снеготаянием (*а*), в процессе снеготаяния и термоинфильтрации (*б*) и в конце снеготаяния (глубина оттаивания почвы 30 см) (*в*).

1 — снег; *2* — талая вода; *3* — ледяной экран; *4* — свободные поры; *5* — поры, занятые водой; *6* — направление стока; *7* — инфильтрация талой воды; *8* — мерзлая почва; *9* — максимальный слой оттаивания (0—30 см).

Величина стока определяется снегозапасами и объемом свободных пор в слое почвы 0–30 см, который, в свою очередь, зависит от запасов влаги в почве. Он равен разнице между общей порозностью и запасами воды в почве. Общая порозность рассчитывается по соотношению объемной и удельной массы почвы. Общая величина стока вычисляется по формуле

$$Y = W_{\text{с}} - \left[\left(1 - \frac{d_v}{d}\right) \cdot 100\right] h \cdot 10 - W_{\text{п}},$$

где Y — величина стока, мм; $W_{\text{с}}$ — запасы воды в снеге, мм; $W_{\text{п}}$ — запасы воды в почве, мм; d_v — объемная масса почвы, г/см^3; d — удельная масса почвы, г/см^3; h — мощность почвенного слоя, м.

Этот способ позволит повысить точность и заблаговременность расчета весеннего склонового стока на сельскохозяйственных землях и по-новому подойти к созданию и реализации важных прикладных разработок в сельском хозяйстве, рациональном природопользовании, борьбе с эрозией почв. Полученные фундаментальные знания дадут возможность выработать новый подход к решению проблемы управления эрозионно-гидрологическим процессом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для разработки системы управления эрозионно-гидрологическим процессом важно знать особенности формирования поверхностного стока на сельскохозяйственных землях при различном их использовании и влиянии на него природных и антропогенных факторов. На основе открытого ранее закона лимитирующих факторов весеннего склонового стока на сельскохозяйственных землях установлено, что при уровнях факторов ниже определенного (лимитирующего) уровня водопроницаемость мерзлой почвы очень высокая, и он не формируется, независимо от запасов воды в снеге. При уровнях факторов выше лимитирующих (глубокое промерзание или большие снегозапасы и увлажнение почвы) сток всегда образуется, и его формирование зависит только от свободной порозности в верхнем (0–30 см) слое почвы, на которую, в свою очередь, влияет ее влажность. Новым фактом для понимания генезиса гидрологического процесса на сельскохозяйственных землях является положение о том, что впитывание (термоинфильтрация) талой воды происходит в самом верхнем слое, глубина которого ограничивается ледяным экраном и колеблется по годам и природным зонам от 3 до 30 см. Влажность почвы представляет собой основной фактор формирования склонового стока, т. е. чем больше влажность почвы в этом слое, тем меньше в ней свободных пор, обеспечивающих впитывание воды. Снегозапасы, накопленные к началу весеннего снеготаяния, не влияют на впитывание, но от них зависит величина стока, т. е. стекает та их часть, которая не впиталась в почву.

Эти фундаментальные знания позволяют по-новому подойти к оценке гидрологического процесса на сельскохозяйственных землях и реализовать важные прикладные разработки.

Работа выполнена за счет средств государственного задания Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН (122020100428–8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барабанов А.Т.** Эрозионно-гидрологическая оценка взаимодействия природных и антропогенных факторов формирования поверхностного стока талых вод и адаптивно-ландшафтное земледелие. — Волгоград: Изд-во Федерал. науч. центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2017. — 188 с.
2. **Докучаев В.В.** Наши степи прежде и теперь (1892). — М.; Л.: Объед. гос. книж.-журнал. Издательств; Изд-во сельскохоз. лит-ры, 1936. — 117 с.
3. **Козменко А.С.** Основы противоэрозионной мелиорации. — М.: Гос. изд-во сельскохоз. лит-ры, 1954. — 424 с.
4. **Барабанов А.Т.** Закон лимитирующих факторов стока талых вод // Докл. РАСХН. — 1994. — № 6. — С. 36–38.
5. **Алексеевский Н.И., Фролова Н.П., Антонова М.М., Игонина М.И.** Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. — 2013. — № 4. — С. 3–12.
6. **Варенцова Н.А, Киреева М.Б., Фролова Н.Л, Харламова М.А., Илич В.П., Сазонов А.А.** Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47, № 6. — С. 694–709.
7. **Гагаринова О.В.** Ландшафтно-гидрологические закономерности формирования стока в бассейне озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 55–60.

8. **Комиссаров М.А., Габбасова И.М.** Эрозия почв при снеготаянии на пологих склонах в Южном Предуралье // Почвоведение. — 2014. — № 6. — С. 734–743.
9. **Кумани М.В., Шульгина Д.В., Киселёв В.В.** Многолетняя динамика основных элементов стока рек в пределах Центрального Черноземья // Региональные геосистемы. — 2021. — № 4. — С. 617–631.
10. **Бураков Д.А., Литвинова О.С.** Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природ. ресурсы. — 2010. — № 3. — С. 111–120.
11. **Мухин В.М.** Методы прогнозирования притока воды в водохранилища за период весеннего половодья // Тр. Гидрометцентра России. Гидрометеорологические прогнозы. — 2014. — Вып. 351. — С. 108–140.
12. **Шеппель П.А.** Специальный весенний попуск паводковых вод Волги. — Волгоград: Нижне-Волж. изд-во, 1990. — 191 с.
13. **Starkloff T.** Winter hydrology and soil erosion processes in an agricultural catchment in Norway [Электронный ресурс]. — https://edepot.wur.nl/425126 (дата обращения 07.08.2023).
14. **Sharratt B.S., Lindstrom M.J., Benoit G.R., Young R.A., Wilts A.** Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern US Corn Belt // Journ. Soil Water Conserv. — 2000. — N 55. — P. 487–494.
15. **Мотовилов Ю.Г.** Система физико-математических моделей формирования речного стока и ее применение в задачах гидрологических расчетов и прогнозов: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — М: Изд-во Ин-та водных проблем РАН, 2019. — 42 с.
16. **Комаров В.Д.** О водопроницаемости мерзлого песка // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. — 1957. — Сб. 3. — С. 142–148.
17. **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.
18. **Калюжный И.Л., Лавров С.А.** Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование. — СПб.: Нестор-История, 2012. — 616 с.
19. **Калюжный И.Л., Павлова К.К., Лавров С.А.** Физическое моделирование процессов миграции влаги при промерзании почв // Метеорология и гидрология. — 1984. — № 1. — С. 77–85.
20. **Гаршинёв Е.А.** Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: Теория и модели. — Волгоград: Изд-во Федерал. науч. центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 1999. — 196 с.
21. **Танасиенко А.А., Чумбаев А.С.** Условия формирования льдистого экрана в эродированных черноземах Западной Сибири // Почвоведение. — 2010. — № 4. — С. 450–460.
22. **Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.** Курс гидрологических прогнозов. — М.: Гидрометеоиздат. 1974. — 422 с.
23. **Патент** RU 2790452 A01 13/16, G01N 33/24. Способ прогнозирования поверхностного стока талых вод в агроландшафтах на водосборных бассейнах Волги и Дона / Барабанов А.Т.; заявитель ФНЦ агроэкологии РАН. № 2021126560, заявл. 08.09.2021 г., опубл. 21.02.2023 г.

Поступила в редакцию 09.10.2023
После доработки 10.11.2023
Принята к публикации 07.05.2024