А. Т. Барабанов

ЭРОЗИОННО-ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ТАЛЫХ ВОД И АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

Волгоград* ФНЦ агроэкологии РАН *2017

УДК 634.0.6:634.0.266

Барабанов А. Т. Эрозионно-гидрологическая оценка взаимодействия природных и антропогенных факторов формирования поверхностного стока талых вод и адаптивно-ландшафтное земледелие. – Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. – 188 с.*

Рассмотрены новые теоретические положения, существенно уточняющие представления о физической природе гидрологических процессов, которые позволили по-новому трактовать условия просачивания талых вод в почву, усовершенствовать существующие и разработать новые математические модели. Приведены материалы исследований, которые дают представление о закономерностях и особенностях формирования стока в разных географических зонах и методах воздействия на него. Установлено, что распределение стока талых вод по территории обусловлено зональными климатическими факторами и видом хозяйственной деятельности. Разработанные теоретические кривые вероятности превышения стока талых вод, выявленные связи его с природными факторами позволили открыть закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод, разработать высокоточную методику его прогнозирования. Предложена новая технология управления эрозионно-гидрологическим процессом.

Barabanov A. T. Erosion-hydrologic assessment of interaction of natural and anthropogenic factors of formation of melt water surface runoff and adaptive landscape farming. – Volgograd: FSC of agroecology RAS, 2017. – 188 p.

The new theoretic propositions refining the conception of physical nature of hydrologic processes which allow a new interpretation of the conditions of melt water seepage into the soil, improvement of existing and development of new mathematic models are considered. The scientific research data providing a rough idea of the regularities and characteristics of runoff formation in different geographic zones and methods to influence it is presented. It has been concluded that the distribution of melt water runoff over the terrain is determined by zonal climatic factors and structure of economic activities. The developed theoretical curves of probability of exceeding melt water runoff, the determined relation between the said runoff and natural factors made it possible to work out the law of limiting factors of the surface melt water runoff and the high-precise methods of its prediction. A new technology of management of erosion-hydrologic process is suggested.

Рецензенты – **В. В. Бородычев**, доктор сельскохозяйственных наук,
академик РАН, профессор;
П. Н. Проездов, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

ISBN 978-5-9909841-4-1

© А. Т. Барабанов, 2017
© ФНЦ агроэкологии РАН, 2017

---

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области, проект "Оптимизация регулирования весеннего паводка на основе разработки высокоточного прогноза поверхностного стока талых вод в бассейне Волжско-Камского каскада водохранилищ, способствующего снижению отрицательного экологического влияния на Волго-Ахтубинскую пойму: экологические, социальные аспекты – улучшение условий жизни людей и животных" № 16-16-34001.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка системы противоэрозионных мероприятий путем регулирования поверхностного стока талых вод должна осуществляться на основе знания закономерностей его формирования. Эта проблема является фундаментальной, очень актуальной и до сих пор нерешенной. Для ее решения необходимо выявить влияние природных и антропогенных факторов на сток талых вод и определить пути использования этих фундаментальных разработок в прикладной науке и практике.

Конкретной задачей данной работы является проведение анализа и обобщение результатов собственных исследований, литературных данных и фондовых материалов, характеризующих связь поверхностного стока с природными (снегозапасы, глубина промерзания, влажность почвы и др.) и антропогенными (обработка почвы, лесополосы, агротехнологии, гидротехника и др.) факторами. Предусматривалось построение математических моделей, обоснование и формулирование закономерностей формирования поверхностного стока талых вод. Они позволят по-новому подойти к оценке эрозионно-гидрологического процесса и осуществить важные прикладные разработки.

Теоретические исследования базировались на анализе и обобщении многолетних (60-68 лет) собственных материалов исследований и данных различных научно-исследовательских учреждений по оценке влияния природных и антропогенных факторов на формирование стока. Анализировались данные, полученные при применении самых совершенных, апробированных многими учеными и получивших широкое распространение водно-балансовых методов: стоковых площадок и репрезентативных водосборов. Использовались статистический, системный и генетический методы исследований, широко применяемые как у нас в стране, так и за рубежом. Метод стоковых площадок позволяет выявить закономерности формирования стока дифференцированно на различных разновидностях почв (тяжелые, средние, легкие, солонцеватые и др.), видах угодий (пашня, луг, залежь) и пашни

(зябь, озимые, многолетние травы и др.).

Целью работы является создание теоретических основ формирования поверхностного стока талых вод на различных видах пашни и сельскохозяйственных угодий в лесостепной, степной и полупустынной зонах европейской части РФ, получение экспериментальных данных по влиянию природных и антропогенных факторов на характер снегоотложения, который является мощным фактором воздействия на сток и эрозию почв.

Характер снегоотложения на расчлененной территории имеет свои особенности. Необходимо было выявить закономерности снегоотложения, характер замерзания, оттаивания и увлажнения почвы и определить главные факторы, влияющие на эти процессы, выявить долю каждого из них и дать им количественную оценку. Это, в свою очередь, позволило определить, на какие природные и антропогенные факторы и чем нужно воздействовать, чтобы путем регулирования снегоотложения предотвратить глубокое промерзание почвы с целью управления эрозионно-гидрологическим процессом.

Для достижения этой цели были обобщены данные по многолетней динамике поверхностного стока талых вод на различных видах пашни и сельскохозяйственных угодий, построены кривые вероятности превышения стока, выявлены закономерности снегоотложения, замерзания, оттаивания и влажности почвы на склоновых землях и влияние этих факторов на эрозионно-гидрологические процессы, осуществлены в разных природных зонах стационарные опыты по оценке влияния антропогенных факторов на природные, выявлению роли взаимодействия природных и антропогенных факторов в формировании поверхностного стока талых вод.

Вопросами поиска эффективных мер борьбы с эрозией почв начали заниматься давно. Большую роль в познании процессов эрозии и разработке противоэрозионных мероприятий сыграли многие ученые [1-18]. Но пока не стал широко применяться водно-балансовый метод изучения стока и эрозии почв, все исследования базировались на оценке отдельных противоэрозионных приемов путем определения влажности почв термостатно-весовым методом и смыва почв методом водороин. В связи с невысокой точностью и репрезентативностью этих методов был допущен ряд ошибок в оценке разработанных к тому времени про-

тивоэрозионных приемов. Например, очень большую роль отводили агротехническим мероприятиям. В рекомендациях и учебниках отмечалось, что они наиболее эффективны и почти не требуют дополнительных затрат. Очень большая роль отводилась искусственному микрорельефу. Переоценка значения агротехнических мероприятий приводила к отрицанию необходимости применения других приемов, в т. ч. и лесомелиоративных.

С началом применения водно-балансового метода исследований стали появляться материалы по объективной оценке противоэрозионных мероприятий [19-21] и было выработано направление исследований по оценке эффективности почвозащитных мероприятий, в основном агротехнических, по природным зонам. Однако в исследованиях по-прежнему преобладали эмпирические методы. Поэтому большое значение имела разработка теоретических основ управления эрозионно-гидрологическими процессами, установление влияния на них природных и антропогенных факторов и создание моделей их взаимодействия. Важнейшими из природных факторов являются снегозапасы и характер снегоотложения, увлажнение и промерзание почвы, а из антропогенных – защитные лесонасаждения, севообороты, обработка почвы, удобрения. Они в основном и рассматриваются в данной работе. Лесомелиоративным мероприятиям, как важнейшему антропогенному фактору, с этих позиций мало уделялось внимания. Очень слабо была изучена снегораспределительная, стокорегулирующая и противоэрозионная роль ЗЛН. Не учитывался ряд важных закономерностей. Недостаточно изучен характер формирования стока и процессов эрозии на сельскохозяйственной территории, не были установлены количественные связи стока с природными факторами, упрощенно понималась роль антропогенных факторов в его формировании, не учитывалось влияние антропогенных факторов на природные, а через них и на эрозионно-гидрологические процессы.

Противоэрозионной лесомелиорации принадлежит ведущая роль в почвозащитном земледелии. Значение ее нельзя рассматривать в отрыве от других его элементов: противоэрозионной организации территории, севооборотов, обработки почвы и др. Необходимо определить ее место в почвозащитной системе земледелия во взаимодействии с другими элементами и выявить пути повышения ее эффективности. Для этого нужна объективная количественная оценка стокорегулирующей, противоэрозионной и

агрономической эффективности каждого элемента почвозащитной системы земледелия в отдельности и роли лесомелиорации в этой системе как наиболее мощного антропогенного фактора, воздействующего на природные факторы (снегозапасы, увлажнение и промерзание почвы и др.).

Поэтому была поставлена задача дать теоретические основы взаимодействия стокорегулирующих лесных полос и других элементов почвозащитной системы земледелия путем выявления закономерностей влияния их на природные факторы и эрозионно-гидрологические процессы для дальнейшего управления ими, совершенствования и разработки новых противоэрозионных приемов.

В настоящей работе рассмотрены теоретические основы формирования стока, установлена связь поверхностного стока с природными факторами при различном антропогенном воздействии, приведена методика его прогнозирования, дана стокорегулирующая, противоэрозионная и агрономическая оценка отдельных противоэрозионных приемов и их сочетаний, определены роль и место агролесомелиорации в адаптивно-ландшафтном земледелии, предложена система эффективных мер по защите почв от эрозии и технология управления эрозионно-гидрологическим процессом.

Новые теоретические положения, существенно уточняющие представления о физической природе гидрологических процессов, позволили по-новому трактовать условия просачивания талых вод в почву, усовершенствовать существующие и разработать новые математические модели. Разработанные теоретические кривые вероятности превышения стока талых вод, выявленные связи его с природными факторами позволили открыть *закон лимитирующих факторов эрозионно-гидрологического процесса*.

В работе приведены и проанализированы многолетние результаты исследований автора за период с 1964 по 2016 г. и материалы, полученные под руководством и по разработанным автором программам и методикам в разные периоды во ВНИАЛМИ (сейчас ФНЦ агроэкологии РАН) и его опытной сети Ф. А. Абдульмановым, В. И. Антоновым, Р. Д. Балычевым, В. П. Борцом, О. В. Богачёвой, И. И. Гункиным, Т. Г. Глыбиным, С. Г. Кириченко, Ю. Н. Коблевым, Л. Я. Королёвой, М. М. Кочкарем, А. В. Кулик, А. В. Лапчуком, Г. Н. Лепилиным, М. М. Ломакиным, В. И. Пановым, Н. Е. Петелько, А. И. Петелько, В. И. Победённым, Р. Е. Смирновым, Ю. М. Суковатовым, Е. Я. Тубольцевым, В. М. Уваровым,

А. И. Узолиным. Выражаю им большую благодарность. Кроме того, были проанализированы многолетние литературные данные и обобщены результаты исследований нескольких поколений ученых ВНИАЛМИ и его опытной сети на юге Центрального района нечерноземной зоны (ЦРНЗ) (Новосильская ЗАГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН), в среднем Поволжье (ФГБНУ Поволжская АГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН), на Среднем Дону (Клетская НИАГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН) и в Нижнем Поволжье (Нижне-Волжская опытная станция по селекции древесных пород – филиал ФНЦ агроэкологии РАН – и ФГУП "Волгоградское"), полученные в стационарных многофакторных опытах с применением водно-балансового метода, являющегося ведущим в противоэрозионной мелиорации, а также генетического и статистического подходов. Были обобщены многочисленные литературные данные, полученные указанными выше методами.

Выражаю особую признательность своему учителю профессору Г. П. Сурмачу, чьи работы и многолетнее сотрудничество с которым оказали большое влияние на формирование моих взглядов и выбор направления научной деятельности. Очень полезным было для меня многолетнее общение и сотрудничество с Е. А. Гаршинёвым. Автор признателен также своим коллегам по совместной работе.

Монография посвящена светлой памяти учителя, ученого, педагога Георгия Пантелеймоновича Сурмача.

1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. 1. Анализ и оценка методов исследований

Методологической основой исследований в противоэрозионной мелиорации является система методов, заимствованных из разных наук: агролесомелиорации, земледелия, почвоведения, гидрологии, физики, химии, математики, геологии, географии и др., – модифицированных и адаптированных в соответствии с поставленными целями и задачами.

Основными показателями для оценки мелиоративной эффективности агролесомелиоративного противоэрозионного комплекса являются снегозапасы, увлажнение, замерзание и оттаивание почвы, сток, смыв, размыв и аккумуляция и др. Интегральным показателем оценки комплекса является урожайность сельскохозяйственных культур. Исходя из этого, применялись и соответствующие методы исследований. Снегоотложение характеризовалось на основе проведения снегомерных съемок, для оценки увлажнения почвы применялся термостатно-весовой метод, замерзание и оттаивание почвы определялись как непосредственно путем бурения и выкопки шурфов, так и по мерзлотомерам Данилина. Сток талых вод определялся балансовым методом на стоковых площадках и водосборах, смыв почв, размыв и аккумуляция – по мутности талой воды и по методу водороин. Урожайность сельскохозяйственных культур учитывали дифференцированно метровками на разном удалении от лесных полос и интегрально комбайном в целом на стоковых площадках и водосборах [22-25]. При разработке методов исследований и анализе полученных материалов были использованы методики Б. А. Доспехова, Г. Н. Зайцева, С. В. Мельникова, В. Р. Алешкина, П. М. Рощина, Т. Литтла, Ф. Хиллза, В. Н. Перегудова, М. М. Протодьяконова, Р. И. Тедера, Г. П. Сурмача [26-33].

В связи с тем, что методы исследований подробно изложены в вышеуказанных работах, здесь мы описания их не будем давать, а остановимся на анализе и оценке применяемых в настоящее

время методов исследований агролесомелиоративного противоэрозионного комплекса, проанализируем методы определения главных показателей оценки противоэрозионного комплекса: стока талых вод, увлажнения и смыва почвы.

Для гидрологического обоснования противоэрозионного комплекса необходимо изучение вопроса о влиянии его на гидрологический режим территории и в первую очередь на поверхностный сток талых вод. Гидрологическим исследованиям посвящено много работ и они имеют довольно длительную историю. Они в основном посвящены гидрологии рек. Исследованию поверхностного стока на сельскохозяйственных угодьях в связи с влиянием природных и антропогенных факторов стали уделять серьезное внимание только в 50-60 гг. XX в. Многими учеными проводились исследования с целью гидрологического обоснования различных приемов и элементов противоэрозионных комплексов [6, 7, 34-44]. В дальнейшем эти исследования получили более широкое развитие и продолжаются и поныне. При этом применяют 2 основных метода: водно-балансовый, который включает и метод стоковых площадок, и метод оценки стока по влажности почвогрунтов. Эти методы до настоящего времени применяются как для характеристики поверхностного стока, так и для оценки стокорегулирующей роли отдельных противоэрозионных приемов, их сочетаний и целых комплексов.

С целью оценки этих двух методов мы проанализировали литературные данные и провели специальные исследования. Большинство исследователей полагают, что применение обоих методов для указанных целей равнозначно, между тем результаты, получаемые этими методами, часто противоречивы и несопоставимы. Впервые на это обратил внимание Г. П. Сурмач [45]. Дальнейшие исследования подтвердили первые результаты [46-52]. Данные по влажности почв обычно используются для выявления эффективности различных противоэрозионных приемов, для прогнозирования стока и др. Иногда делаются попытки определить на основании изменения влажности почвы показатели стока талых вод, что неправомерно. Достоверность полученных опытным путем данных тем выше, чем выше точность применяемых методов исследования. Она зависит от точности непосредственных измерений и репрезентативности (представительности) их статистических показателей, т. е. от того, насколько точно они характери-

зуют генеральную совокупность.

По данным Е. А. Гаршинёва [53], осуществившего математическую обработку экспериментальных материалов, обычно при существующих способах измерения различных гидрологических показателей (высота и плотность снега, напор воды на водосливе, ее объем и др.) получается довольно низкая относительная погрешность (0,2-2,0 %, редко 5-10 %), и достоверность результатов определяется в первую очередь объемом выборки. Большое количество измерений (50-300), которые обычно выполняются при определении влагозапасов в снеге и расходов воды на водосливе, обеспечивает вполне удовлетворительную точность исследования (около 2-5 %) и позволяет по разности между запасами снеговой воды и стоком довольно точно найти слой просочившейся в почву воды (испарением за период снеготаяния можно пренебречь, так как оно очень мало) и следовательно дать надежную оценку увлажнительной роли изучаемого приема [48].

Иное положение складывается при оценке увлажнения почвы с помощью термостатно-весового метода при 3-5-кратной повторности измерений. Естественная вариация влажности почвогрунта довольно велика, что наглядно показано на рис. 1.1. Здесь представлены кривые изменения влажности почвогрунта на разных видах пашни (зябь обычная и заборонованная, озимые, многолетние травы) в ФГУП "Волгоградское" (г. Волгоград). Анализ этих кривых показывает, что влага в почве распределяется крайне неравномерно. Характер ее распределения связан не с особенностями видов пашни, а с неоднородностью литологического строения почвогрунта. Наиболее равномерно влага распределяется в пахотном слое. В более глубоких слоях, сложенных чередующимися прослойками грунтов легкого (пески и супеси) и тяжелого (глины) гранулометрического состава, кривые влажности приобретают пилообразную форму. Поскольку мощность и глубина залегания разных прослоек сильно изменяется в разных, даже близко расположенных точках, то повторные бурения дают хотя и похожие, но различные кривые влажности. Иными словами, изменение формы этих кривых связано не столько с временны́ми изменениями влажности, сколько с пространственными вариациями гранулометрического состава.

Приведенные в табл. 1.1 результаты статистической обработки данных [48] по 12 скважинам, пробуренным в ОПХ Новосильской

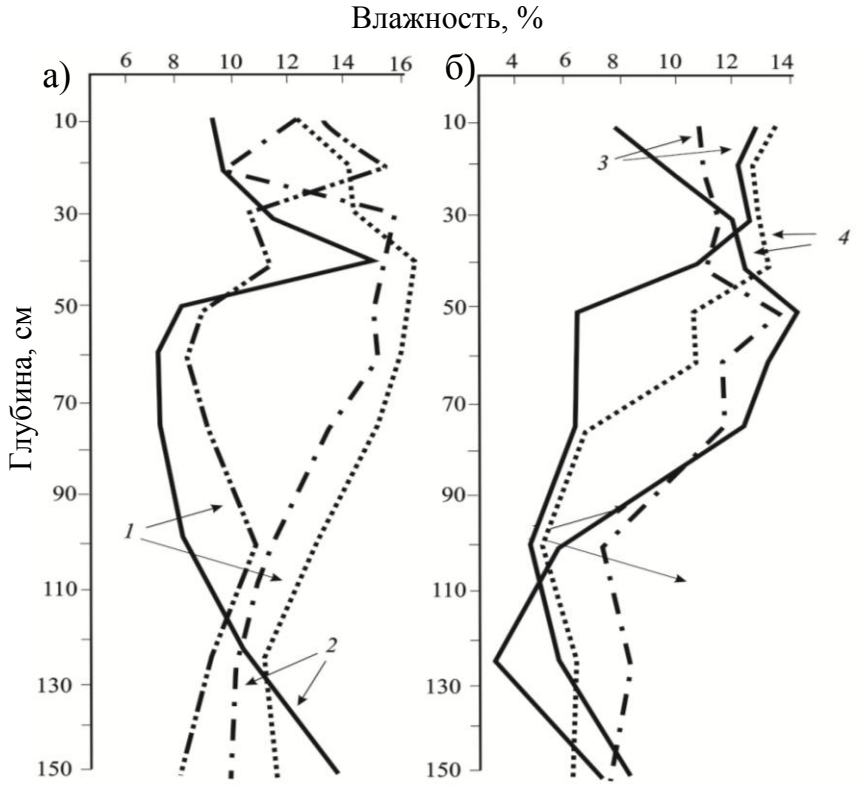


Рис. 1.1. Графики распределения влаги в почвогрунте:

а – на обычной (1) и заборонованной (2) зяби; б – на многолетних травах (3) и озимых (4) в ФГУП "Волгоградское" (сплошная линия – осенью, штриховая – весной)

ЗАГЛОС, показывают, что 2-5-кратная повторность бурения скважин обеспечивает хорошую точность лишь при уровне доверительной вероятности P = 68 %, т. е. примерно в двух случаях из трех, что допустимо только в разведочных экспериментах и при ожидаемых значительных различиях во влажности изучаемых вариантов.

Однако 4-5-кратная повторность не гарантирует от серьезных ошибок при оценке влажности отдельных слоев почвы (в рассматриваемом примере – на глубине 45-50 см осенью, 70-75 и 95-100 см весной). Достижение обычно принимаемого в полевых исследованиях уровня доверительной вероятности P = 95 % требует около 10 повторностей осенью и 20-60 весной.

Аналогичные результаты получены нами на светло-каштановой почве ФГУП "Волгоградское" на площадке с выровненной зябью, где влажность определяли в пяти точках с 3-кратной повторностью (табл. 1.2). Из анализа вариационно-статистических показателей видно, что для получения точности опыта 5 % при уровне вероятности P = 0,95 необходимо на площадке 0,15 га определять влажность в слое 0-50 см в одной-пяти точках, в слое 0-100 см в 11-19 точках, а в слое 0-150 см в 11-13 точках с 3-кратной повторностью в каждой. Эти же данные показывают, что прибавка влагозапасов в почве за осенне-зимне-весенний период в среднем составила в слое 0-50 см – 16 мм, в слое 0-100 см – 32, а в

Таблица 1.1

Результаты вариационно-статистической обработки влажности почвы (%) по 12 скважинам на Новосильской ЗАГЛОС

Вариационно-статистические показатели	Осень							Весна						
	глубина отбора образцов, см													
	0-5	20	50	75	100	125	150	0-5	20	50	75	100	125	150
Значения влажности:														
X_{max}	33,10	22,80	31,20	17,40	18,60	24,20	25,70	28,90	26,90	22,50	23,50	23,70	26,70	28,40
X_{min}	26,40	20,50	11,80	14,00	14,10	18,20	19,60	25,40	20,20	13,80	12,80	13,70	18,20	18,70
Амплитуда значений, X_{max}-X_{min}	6,70	2,30	19,40	3,40	4,50	6,00	6,10	3,50	6,70	8,70	10,70	10,00	8,50	9,70
Средняя арифметическая, X_0	29,20	21,40	14,60	15,40	16,90	21,00	23,40	26,90	23,40	19,90	17,80	17,50	21,50	24,10
Основное отклонение, ± σ	2,18	0,81	5,51	1,09	1,33	1,65	1,50	1,29	2,41	2,78	3,66	3,06	2,22	2,50
Ошибка средней арифметической, ± m	0,63	0,23	1,66	0,31	0,40	0,47	0,43	0,37	0,69	0,80	1,06	0,88	0,64	0,74
Коэффициент вариации, ± V	7,47	3,78	37,70	7,06	7,89	7,84	6,42	4,80	10,30	14,00	20,60	17,50	10,30	10,70
Точность исследования (опыта), ± m%	2,16	1,09	11,40	2,04	2,48	2,26	1,85	1,39	2,97	4,04	5,96	5,05	2,99	3,10
Необходимая повторность при P = 0,68, t = 1,0 и m% = 5	2,00	1,00	57,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	4,00	8,00	17,00	12,00	4,00	5,00
Необходимая повторность при P = 0,95, t = 20 и m% = 5	9,00	2,00	228,00	8,00	10,00	10,00	7,00	4,00	17,00	31,00	67,00	48,00	17,00	18,00

Таблица 1.2

Вариационно-статистические показатели точности определения запасов влаги в ОПХ ВНИАЛМИ (г. Волгоград)

Показатель	0-50 см		0-100 см		0-150 см	
	осень	весна	осень	весна	осень	весна
Средняя арифметическая, X	87	103	160	192	255	258
Основное отклонение, ± σ	4,90	11,64	34,78	31,28	43,02	46,00
Коэффициент вариации, ± V	5,7	11,3	21,7	16,3	16,9	17,8
Ошибка средней арифметической, ± m	2,2	5,2	15,5	14,0	19,2	20,5
Точность опыта, ± m %	2,5	5,0	9,7	7,3	7,5	7,9
Необходимое количество точек для получения точности 5 % при P = 0,95	1	5	19	11	11	13

слое 0-150 см – всего 3 мм. При этом в 1, 3 и 5-й точках для слоя 0-150 см прибавка влагозапасов колебалась от 11 до 39 мм, а во 2 и 4-й точках отмечена их убыль на 18 и 49 мм соответственно. Между тем, при запасах снеговой воды на площадке 55 мм и слое стока 11 мм просачивание влаги в почву составило 44 мм. Таким образом, здесь налицо явное несоответствие данных об увлажнении почвы, полученных разными методами. Мы и другие сотрудники под нашим руководством (И. И. Гункин, Ф. А. Абдульманов, М. М. Ломакин, Е. Я. Тубольцев, Н. Е. Петелько, А. И. Петелько, Ю. И. Коблев и др.) применяли термостатно-весовой и балансовый методы для оценки увлажнительной и стокорегулирующей эффективности противоэрозионных приемов в течение многих лет и выявили противоречивость и несопоставимость данных, полученных этими методами. Рассмотрим здесь часть наиболее характерных результатов. В табл. 1.3 приведены результаты иссле-дований автора в Новосильском р-не Орловской обл. и М. М. Ломакина в Фатежском р-не Курской обл. под руководством автора. В Новосильском р-не на четырех стоковых площадках с одинаковым агрофоном (зяблевая вспашка поперек склона на глубину 25-27 см) стока талых вод не было, в почву просочилось 143-154 мм снеговой воды (балансовый метод). Прибавки же весенней влаги в слое 0-150 см, найденные термостатно-весовым методом, колебались от 83 до 161 мм.

В Фатежском р-не, по данным учета стока, в почву просочилось примерно одинаковое количество воды (19-25 мм). В то же

Таблица 1.3

Показатели просачивания снеговой воды, определенные по влажности 1,5-метрового слоя почвы и балансовым методом с учетом стока (мм)

Метод	Новосильский р-н Орловской обл.				Фатежский р-н Курской обл.			
	зяблевая вспашка на глубину 25-27 см				обработка на глубину 20-22 см			щелевание
	повторность				ПН-4-35	ПН-4-35А	КПГ-250	
	1	2	3	4				
По разности во влагозапасах перед снеготаянием и после стока	83	138	132	161	–31	38	–2	–21
Метод водно-балансовых площадок	143	149	154	154	22	25	20	19

время прибавки/дефицит запасов весенней влаги в слое 0-150 см при определении термостатно-весовым методом колебались от –31 мм до +38 мм.

Основная причина отмеченных расхождений – недостаточность 3-4-кратной повторности отбора образцов, не обеспечивающая удовлетворительную репрезентативность, а также неучет потерь почвенной влаги на испарение в период от момента прекращения стока до взятия образцов почвы на влажность.

Данные о влажности почвы, полученные термостатно-весовым методом, характеризуют распределение влаги в данной точке и их трудно распространять на большую площадь. Положение осложняется тем, что, поскольку образцы отбираются не в виде сплошной колонки, а прерывисто, при неоднородном (слоистом) литологическом составе почвогрунта возможны значительные отклонения полученных показателей от истинных, что нередко наблюдается в натуре. Для получения достоверной характеристики запасов влаги в почве на территории нужно большое число повторностей, однако это трудно осуществимо.

Таким образом, на основе определения влажности почвы нельзя дать оценку стокорегулирующей роли противоэрозионных приемов и тем более почвозащитной системе в целом. Для этой цели необходимо применять метод водно-балансовых (стоковых) площадок; термостатно-весовой метод должен играть вспомогательную роль для оценки общего увлажнения почв с целью прогноза стока, динамики запасов влаги за определенный период и пр.

Смыв почвы в настоящее время в основном учитывается двумя способами: по водороинам и по мутности стока. Как правило, в исследованиях используется один из этих методов. До конца 50-х гг. XX в. в основном применялся метод замера водороин. Затем, когда в эрозионных исследованиях все более широкое распространение стал получать метод стоковых площадок, смыв почвы чаще стал определяться по мутности стока. Рассматриваемые методы не являются равноценными. Некоторые исследователи применяют их одновременно.

Оценку этим методам давали многие исследователи [48-57]. Г. П. Сурмач [58] рекомендовал применять оба метода. А. Г. Рожков [54], сравнивая их, считал, что "метод замера водороин является единственным широко доступным методом, позволяющим объективно выявить участки склонов с различной интенсивностью смыва почвы после каждого ливня или снеготаяния на зяби, парах, в садах, на пропашных культурах, а также на посевах густопокровных культур в ранней стадии их развития, т. е. на наиболее эрозионно-опасных угодьях. Но он практически неприменим на сенокосах, пастбищах и в лесах. Метод учета смыва по мутности воды на стоковых площадках позволяет получать интегральную величину смыва с любого угодья, но не пригоден для выявления участков склона с разной интенсивностью эрозии". Он считал также, что пользуясь обоими методами учета смыва, можно объективно давать относительную противоэрозионную оценку изучаемых приемов, однако эти данные нельзя использовать для расчета фактического смыва с площади всего склона. Н. М. Шелякин [56], проанализировав разные методы учета смыва, рекомендует применять два метода: по мутности стока и по водороинам. При этом он считает, что учет смыва по мутности стока дает достоверные данные по величине смыва со всего склона при условии установки стокового оборудования на ложбинных водосборах. Учет же смыва по водороинам, по его мнению, желательно проводить в разных частях водосбора на вторичных склонах при отсутствии на них стоковых площадок.

В. Н. Дьяков [55], сравнивая два метода учета смыва, пришел к выводу, что "смыв, учтенный по мутности с естественных водосборов по остаточному стоку, не характеризует его величины на различных элементах рельефа, особенно при наличии лесных полос на склонах теневых экспозиций, и имеет значение в основном при

учете наносов, поступающих в гидрографическую сеть". Наиболее приемлемым он считает метод учета смыва по водороинам.

Нами, начиная с 1964 г., осуществлялась сравнительная оценка двух методов учета смыва. Рассмотрим здесь часть материалов, полученных в период с 1967 по 1974 г. на Новосильской ЗАГЛОС им. А. С. Козменко, где проводилось изучение смыва почв параллельно по методу водороин и по мутности твердого стока на стоковых площадках в связи с различным характером обработки почвы (табл. 1.4). В результате проведенных наблюдений можно сказать следующее. Замер водороин позволяет получить интегральный показатель смыва за период, а по мутности можно проследить за динамикой выноса почв во времени. При определении смыва по водороинам часто очень трудно учесть переотложение мелкозема, что приводит к завышению выноса почвы со склона. К ошибке при измерении водороин приводит также замер так называемой "пустоты". Дело в том, что при поверхностном стоке часто водороины приурочены к разного рода микропонижениям, образующимся при обработке почвы, к следам почвообрабатывающих орудий, т. е. общий объем водороин получается, как правило, больше объема вынесенной почвы.

Если судить о выносе почвы с поля по мутности стока, то можно также допустить ошибку. Обычно мутность определяется в замыкающем створе балки, лощины, ложбины, стоковой площадки. Однако в понижениях часто накапливается больше снега, которым кольматируется мелкозем. Иначе говоря, со склона мелкозем вынесен, но он отложился (кольматировался) выше замыкающего створа, например на берегу гидрологической сети, и не был зарегистрирован. Бывает и так, что на стоковой площадке в нижней ее части накапливается больше снега, чем в верхней, вследствие чего до водослива доходит частично отфильтрованная вода. Подобная ситуация наблюдается, когда в нижней части склона имеется прибалочная лесополоса. Если определять мутность стока в замыкающем створе ниже лесополосы, то можно сделать ошибочный вывод о том, что смыва почвы с поля не было вовсе или он был совершенно незначительным.

Оценивая эти методы в целом, следует сказать, что метод замера водороин дает завершенные результаты. Более точные результаты получаются по методу определения мутности твердого стока, хотя в ряде случаев он дает заниженные показатели смыва почвы.

Таблица 1.4

Сравнительная оценка методов учета смыва почв

Характер зяблевой обработки почвы	Год	Метод учета смыва		
		по водороинам		по мутности стока, т/га
		$м^3$/га	т/га	
Отвальная поперек склона на глубину 25-27 см	1967	7,2	9,4	0,42
	1968	0	0	0
	1969	0,3	0,4	0,25
	1969	0,9	1,2	0,11
	1970	1,8	2,3	0,79
	1970	3,0	3,9	0,83
	1971	5,5	7,1	1,13
	1971	4,4	5,7	0,61
	1972	0	0	0,04
	1973	3,3	4,3	0,32
	1974	4,2	5,5	0,60
То же + прерывистое бороздование поперек склона через 3-4 м	1967	12,7	16,5	0,71
	1968	0	0	0
	1969	1,7	2,2	0,53
	1970	3,2	4,2	1,02
Гребнистая поперек склона	1968	0	0	0
	1969	1,6	2,1	0,11
	1970	2,6	3,4	0,95
	1971	2,9	3,8	0,80
	1972	0	0	0,13
	1973	10,0	13,0	0,68
	1974	2,0	2,6	0,49
Лункование зяби	1969	2,0	2,5	0,33
	1969	1,5	1,9	0,12
	1970	2,9	3,8	0,82
	1970	3,3	4,5	0,76
	1971	1,0	1,3	1,01
	1972	0	0	0,06
	1973	1,3	1,7	0,76
	1974	1,8	2,3	0,27

Анализ всех материалов указывает на целесообразность применения обоих методов определения смыва одновременно и на необходимость совершенствования методов учета смыва.

1.2. Генетические и статистические методы исследований и анализа материала

Вопрос о методах эрозионно-гидрологических исследований имеет большое значение. В гидрологии сейчас широко распространены два главных направления: статистический и генетический. Статистические методы основываются на законе больших чисел и допущении случайности проявления гидрологических процессов. Эти методы сыграли большую роль в гидрологии, особенно при недостатке исходных материалов для теоретических исследований, они имеют ряд существенных недостатков, главный из которых – невозможность познания генезиса процесса, выявления причинно-следственных связей, – а отсюда и невозможность регулирования, управления процессами. Статистические методы позволяют вести приближенные гидрологические расчеты. С их помощью в свое время удалось быстро удовлетворить запросы гидрологического строительства. Однако они не могли удовлетворить потребности гидрологии и для решения фундаментальных проблем требовалось развитие теоретических исследований.

В 30-е гг. XX в. В. Г. Глушков выдвинул идею географо-гидрологического метода (по М. И. Львовичу [6]), базирующегося на генетической основе с учетом влияния всех факторов. Этот метод в дальнейшем получил широкое развитие и стал основным в гидрологии. Однако и статистические методы играют еще большую роль, особенно при изучении поверхностного стока с сельскохозяйственных угодий (сельскохозяйственная гидрология), оценке эффективности противоэрозионных приемов и др. В этой области гидрологии пока накоплено мало материала, поэтому регулирование стока и борьба с эрозией осуществляются либо без расчетов, либо на основе приближенных расчетов, что можно делать применяя статистические методы. Генетический подход получил пока малое распространение.

В наших исследованиях и при анализе материалов мы использовали и статистический, и генетический подходы. Статистические методы мы применяли для оценки поверхностного стока разной вероятности превышения с сельскохозяйственных угодий, выявления стокорегулирующей, противоэрозионной и агрономической эффективности различных приемов, элементов противоэрозионного комплекса и их сочетаний и др. При этом мы

получаем сравнительную интегральную оценку приемов, но нам неизвестно, почему один прием эффективнее другого, как он влияет на показатели эффективности другого и на какие рычаги воздействовать, чтобы совершенствовать приемы. Статистические методы оценки эффективности противоэрозионных приемов не всегда можно применять, так как при этом требуется большая повторность вариантов, а при изучении стока на стоковых площадках больших размеров (малые делянки здесь неприемлемы) не всегда есть возможность закладывать опыты из-за недостатка подходящей площади. Поэтому наряду со статистическими мы применяли и генетические методы.

Генетический подход мы использовали и при изучении закономерности формирования стока и эрозии. Дело в том, что характер формирования стока, процессов смыва, урожая сельскохозяйственных культур – главных показателей оценки антропогенного воздействия – обусловлен многими природными факторами (снегозапасы, характер увлажнения и промерзания почвы, погодные условия и др.) и хозяйственной деятельностью людей, действующими в совокупности. Антропогенное воздействие на эрозионно-гидрологические процессы и сельскохозяйственные культуры осуществляется через эти факторы. Нам важно знать не только степень того или иного воздействия, но и как, через какие факторы и показатели оно происходит. Это позволяет научиться управлять процессами, разрабатывать новые приемы борьбы с эрозией почв. Для этого закладывались элементарные и комбинированные стоковые площадки как по всему склону, так и по отдельным его частям с охватом целых противоэрозионных комплексов и его элементов. При этом проводили снегомерные съемки, наблюдения и определения метеорологических показателей (температура, влажность воздуха, осадки, ветер, облачность и др.), промерзания, оттаивания, влажности почвы, объемной массы почвы, стока талых вод, смыва почвы, питательного режима, засоренности посевов, урожайности сельскохозяйственных культур, роста древесных пород.

1.3. Системный подход в исследовании взаимосвязи природных и антропогенных факторов

К настоящему времени накоплен большой материал по противоэрозионной, стокорегулирующей и агрономической эффек-

тивности отдельных приемов: лесных полос, приемов обработки почвы, севооборотов, гидротехнических сооружений [6-8, 12, 16, 59-63]. Вопросам комплексного воздействия почвозащитных приемов посвящено мало работ и в основном они касаются совместного влияния двух элементов комплекса. Сочетание лесных полос с простейшими гидротехническими сооружениями и агротехническими мероприятиями изучали многие исследователи [5, 17, 63-67]. Получены данные по совместному влиянию сочетаний элементов комплекса на эрозионно-гидрологические показатели и влиянию их на эффективность друг друга. Полный же комплекс противоэрозионных мероприятий изучался недостаточно и почти не ставилась задача выявления роли каждого элемента во взаимосвязи.

Для оценки полного комплекса противоэрозионных мероприятий, выявления взаимосвязи его элементов мы использовали принципы системного подхода. Он заключался в проведении многофакторных опытов и корреляционно-регрессионом анализе полученных в них материалов, а также в опытах других исследователей [68]. Осуществлялся также анализ связи поверхностного стока с природными факторами: запасами воды в снеге и почве перед снеготаянием, глубиной промерзания почвы, продолжительностью снеготаяния, – что позволило выявить интересные зависимости.

Таким образом, применение статистического, генетического элементов системного подхода и проведение многофакторных исследований позволили выявить не только влияние отдельных природных и антропогенных факторов на эрозионно-гидрологические процессы, но и их взаимодействие.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретические исследования осуществлялись на основе анализа и обобщения собственных и литературных данных, полученных в разных зонах европейской части Российской Федерации: юг Центрального р-на Нечерноземной зоны (ЦРНЗ), Центрально-Черноземная область (ЦЧО), Поволжье. Объекты исследований расположены в лесостепи, степи, полупустыне и охватывают широкий диапазон условий, которые отличаются многообразием природных и антропогенных факторов, обусловливающих эрозионно-гидрологические процессы. В связи с тем, что в последующих главах будет подробно рассмотрено влияние этих факторов на сток талых вод и эрозию почвы как отдельно, так и во взаимодействии, приведем здесь лишь обобщенную характеристику почв и природных факторов в разных почвенно-климатических зонах. Как видно из табл. 2.1, в которой приведена характеристика почв, исследованиями было охвачено большое разнообразие типов почв: серые лесные, черноземы (оподзоленный, типичный, выщелоченный, обыкновенный), каштановые и светло-каштановые. Анализ данных показывает, что эти почвы обладают большим разнообразием свойств. Мощность гумусового горизонта, содержание гумуса, ряд водно-физических и химических свойств в значительной степени различаются у разных типов почв. Они в свою очередь обусловливают гидрологические процессы и противоэрозионную устойчивость почв.

Серая лесная почва характеризуется малой мощностью гумусового горизонта (25-30 см) и небольшим содержанием гумуса (2,1 %); большой гидролитической кислотностью и объемной и удельной массой; низкой влагоемкостью, водопрочностью структуры и водопроницаемостью. Все это обусловливает формирование большого стока и низкую противоэрозионную устойчивость почвы.

Черноземы всех разновидностей имеют более мощный гумусовый горизонт, повышенное содержание гумуса (особенно типичный и выщелоченный), низкую объемную массу, высокую влагоемкость, водопроницаемость и водопрочность структуры.

Таблица 2.1

Общая характеристика почв на объектах исследований

Зона, область, почва	Мощность гумусового горизонта, см	Содержание гумуса, %	Обменные катионы, мг-экв. на 100 г почвы					Емкость поглощения	Гидролитическая кислотность	Валовое содержание, %			Масса, г/см^3		Наименьшая влагоемкость, %
			Ca	Mg	Na	K	сумма	мг-экв. на 100 г почвы		NO_2	P_2O_5	K_2O	объемная	удельная	
Юг ЦРНЗ, Орловская, серая лесная	25-30	2,1	15,0	4,0	0,2	0,2	19,4	22,8	3,5	0,29	0,17	1,78	1,37	2,66	24
ЦЧО, Курская, типичный чернозем	70-75	5,6	35,3	4,1	0,1	0,4	39,9	40,8	3,2	0,29	0,01	2,40	1,28	2,62	35
ЦЧО, Воронежская, обыкновенный чернозем	65-75	4,7	40,3	5,5	0,9	1,0	47,7	48,4	3,1	0,30	0,15	2,20	1,10	2,44	32
Поволжье, Самарская, обыкновенный чернозем	45-65	4,6	28,2	6,3	0,6	0,1	35,2	37,1	1,1	0,20	0,14	2,21	1,17	2,67	30
Поволжье, Волгоградская, каштановая	30-40	1,1	16,8	5,5	1,0	0,9	24,2	26,5	-	0,20	6,50	3,93	1,28	2,70	24
Поволжье, Волгоградская, светло-каштановая	25-30	0,8	24,8	4,8	1,4	-	31,0	37,3	-	-	-	-	1,66	2,65	14

Поэтому у них более высокая по сравнению с серыми лесными и каштановыми почвами противоэрозионная устойчивость и формируется меньший сток.

Каштановые и светло-каштановые почвы по своим свойствам находятся ближе к серым лесным. У них мощность гумусового горизонта небольшая, содержание гумуса незначительное (около 0,8-1,1 %), плохие водно-физические свойства, что обусловливает их низкую противоэрозионную устойчивость и благоприятные условия для формирования стока.

Большим разнообразием природных факторов эрозионно-гидрологических процессов характеризуются объекты исследований. Известно, что влияние на сток и эрозию в разной степени оказывают осадки, температура воздуха, замерзание, оттаивание и увлажнение почвы, снегозапасы, характер и продолжительность снеготаяния и другие. Обобщенная характеристика их приведена в табл. 2.2 и 2.3. Они будут в основном использованы ниже при анализе связи стока талых вод с природными и антропогенными факторами. Здесь же мы остановимся коротко на общей характеристике показателей этих факторов. Не вдаваясь в характер влияния природных факторов на сток, отметим, что во всех исследуемых районах они изменяются в широком диапазоне, причем находятся, как правило, на высоком уровне. Общее закономерное изменение их происходит при движении с севера на юг. Например, снегозапасы на уровне 50 %-ной обеспеченности составляют: на юге ЦРНЗ – 119-120 мм, в ЦЧО – 68-89 и в Поволжье – 42-77 мм. Снегозапасы 10 %-ной вероятности превышения колеблются от 183-188 мм на юге ЦРНЗ до 77-116 в Поволжье. Подобным образом изменяются и влагозапасы в почве, глубина ее промерзания и продолжительность снеготаяния.

Характеризуя опытные объекты в целом, следует отметить, что природные факторы (рельеф, осадки, влагозапасы в снеге и почве, глубина ее промерзания и др.) и хозяйственная деятельность людей создают благоприятные условия для формирования стока и процессов эрозии во всех природных зонах. Наилучшие условия для стока талых вод и эрозии бывают на серых лесных почвах юга Центрального района Нечерноземной зоны. При движении с севера на юг к черноземам и каштановым почвам роль природных факторов в эрозионно-гидрологических процессах уменьшается.

Таблица 2.2

Обобщенная характеристика природных факторов эрозионно-гидрологического процесса

Зона, область	Осадки, мм			Температура воздуха, °С			Максимальная глубина промерзания, см	Снегозапасы, мм	Запас воды в почве (0-50 см) перед снеготаянием, мм	Средняя продолжительность снеготаяния, сут.	Направление метельных ветров
	всего	холодного периода	теплого периода	средняя	макс.	мин.					
Юг ЦРНЗ, Орловская	545	130	415	4,5	+38	–44	182	21-220	123-248	21-22	Не выражено
ЦЧО, Курская	500	165	335	5,1	+41	–40	> 150	25-155	158-230	20-22	Не выражено
ЦЧО, Воронежская	350	130	220	6,9	+40	–36	> 150	23-152	111-220	15-18	Слабо выражено, ЮВ и СВ
Поволжье, Самарская	400	120	280	3,7	+38	–46	144	43-147	101-177	14-15	Слабо выражено, Ю и ЮЗ
Поволжье, Волгоградская, г. Камышин	341	80	261	6,5	+37	–40	150	10-130	47-101	6-10	Слабо выражено, ЮВ
Поволжье, Волгоградская	350	93	257	7,7	+36	–40	140	15-100	52-130	5-8	Слабо выражено, СВ

Таблица 2.3

Показатели природных факторов эрозионно-гидрологического процесса разной вероятности превышения перед снеготаянием (числитель – рыхлая, знаменатель – уплотненная пашня)

Фактор	Вероятность превышения, %												C_v	C_s	X
	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Юг ЦРНЗ, Орловская обл.															
Снегозапасы, мм	239/247	202/207	189/188	161/164	146/147	132/132	120/119	109/106	96/91	82/74	62/50	18/18	0,39/0,45	0,16/0,02	122/119
Влагозапасы в почве, мм*	244/246	216/218	203/205	188/190	178/180	170/172	163/165	157/159	150/153	143/146	134/138	117/122	0,16/0,16	0,71/0,81	166/169
Глубина промерзания почвы, см	206/182	161/143	139/124	114/101	97/85	82/73	70/61	57/50	45/38	32/26	13/8	0/0	0,67/0,71	0,50/0,40	74/64
Продолжительность снеготаяния, сут.	29/33	25/28	23/25	20/22	18/20	17/18	15/16	14/14	12/12	11/10	8/7	2/1	0,37/0,44	0,38/0,5	15/16
ЦЧО, Курская обл.															
Снегозапасы, мм	161/183	137/154	125/139	110/122	100/109	91/99	82/89	74/79	65/68	55/55	40/38	5/4	0,40/0,45	0,67/0,04	82/89
Влагозапасы в почве, мм*	286/260	250/234	233/221	214/205	201/193	191/183	183/174	175/165	167/156	158/144	147/128	128/90	0,18/0,20	0,84/0,94	187/174
Глубина промерзания почвы, см	166/120	140/109	126/104	110/98	99/93	89/89	81/86	72/82	63/78	53/74	38/68	7/53	0,42/0,16	0,20/0,37	82/86
Продолжительность снеготаяния, сут.	22	18	16	14	12	11	9	8	7	5	3	1	0,57	0,05	9
ЦЧО, Воронежская обл.															
Снегозапасы, мм	166/181	137/146	122/128	105/107	92/92	81/80	71/68	61/57	51/45	38/31	22/13	8/13	0,55/0,64	0,14/0,90	72/69
Влагозапасы в почве, мм*	258/229	234/204	222/192	208/177	198/166	189/157	181/148	173/140	165/131	154/120	140/105	107/70	0,18/0,23	0,83/0,63	181/148

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Глубина промерзания почвы, см	125/87	101/80	89/77	77/72	68/69	62/67	56/54	51/62	46/59	41/56	35/52	23/43	0,37/0,15	0,90/0,61	60/64
Продолжительность снеготаяния, сут.	25/34	21/28	19/25	17/21	15/19	14/17	12/15	11/14	10/12	8/10	5/8	2/3	0,44/0,41	0,28/0,61	12/16
Поволжье, Самарская обл.															
Снегозапасы, мм	136/134	108/115	95/106	81/96	72/88	66/82	60/77	54/72	50/66	44/60	38/52	19/36	0,36/0,27	1,13/0,45	64/78
Влагозапасы в почве, мм*	197/279	167/242	153/223	139/281	130/185	122/171	117/158	111/145	106/132	101/115	95/93	86/40	0,20/0,32	1,16/1,68	121/158
Глубина промерзания почвы, см	213/201	183/184	168/173	150/160	137/150	126/142	116/134	106/126	95/118	82/108	64/95	42/63	0.35/0,23	0,27/1,02	116/134
Продолжительность снеготаяния, сут.	32/31	26/24	22/21	19/17	16/14	14/12	12/12	10/9	8/8	6/6	3/4	0/0	0,63/0,55	0,45/0,87	12/12
Поволжье, Волгоградская обл., г. Камышин															
Снегозапасы, мм	161/156	132/129	116/115	99/99	86/87	75/77	66/68	56/59	46/49	34/37	19/21	0/0	0,57/0,54	0,23/0,01	67/75
Влагозапасы в почве, мм*	127/167	110/135	101/119	91/102	84/90	78/80	72/72	67/64	61/55	54/46	45/35	25/12	0,30/0,45	0,15/0,57	73/75
Глубина промерзания почвы, см	235/253	189/199	167/172	139/140	119/116	102/96	87/78	71/59	54/39	34/16	7/8	0/0	0,72/0,95	0,23/0,05	78/78
Поволжье, г. Волгоград															
Снегозапасы, мм	115/126	89/100	77/87	64/72	55/62	48/54	42/46	37/39	31/32	26/24	19/14	6/0	0,51/0,59	0,85/0,53	46/49
Влагозапасы в почве, мм*	151/141	126/126	115/118	102/109	92/102	85/97	78/92	71/87	64/82	56/76	46/68	24/57	0,34/0,21	0,36/0,19	80/92
Глубина промерзания почвы, см	249/251	189/201	159/177	124/147	100/125	80/107	62/90	45/43	27/55	8/33	0/3	0/0	1,04/0,75	0,43/0,31	67/90

*Примечание. *Влагозапасы в слое 0-50 см перед снеготаянием.*

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ТАЛЫХ ВОД

3. 1. Рельеф как фактор эрозионно-гидрологического процесса

3.1.1. Теоретические основы рельефообразования

В силу того обстоятельства, что рельеф территории является ведущим фактором в проявлении эрозии, рельефообразованию всегда уделялось большое внимание как у нас в стране, так и за рубежом. Первые наиболее серьезные попытки исследовать склоновый сток и рельефообразование связаны с деятельностью экспедиции В. В. Докучаева в южных районах России, главным образом в Каменной степи. В. В. Докучаеву принадлежит попытка теоретического рассмотрения вопросов рельефообразования на равнине в части, касающейся генезиса гидрографической сети (переход оврагов в балки, а балок в речные долины). Однако ученым не была проведена четкая грань между древней (балочно-долинной) и современной (промоинно-овражной) гидрографической сетью [69]. Важное значение имели и работы П. А. Костычева [70] о роли естественной (целинной) травянистой растительности в образовании "настоящих" оврагов антропогенного происхождения. Ученый полагал, что на целине, в отличие от пахотных земель, овраги не образуются. Выдающийся вклад в разработку теории эрозионно-гидрологического процесса принадлежит А. С. Козменко [2] и Г. П. Сурмачу [71] в период их деятельности во Всесоюзном (затем Всероссийском) научно-исследовательском институте агролесомелиорации.

На начальном этапе исследований рельефа на первое место выдвигались вопросы эрозионного размыва – оврагообразования. Разработкой этих вопросов занимались многие ученые [71-77]. Были предложены разнообразные классификации размывов по их положению на водосборе (донные, береговые, склоновые) и стадиям развития во времени (водороины, промоины, овраги). Значительно меньшее внимание на начальном этапе исследований уделялось изучению стока талых и ливневых вод и смыва почв. Так, лишь в XX в. по материалам обследований 1935-1940 гг. в

Почвенном институте была создана первая в СССР мелкомасштабная (М 1 : 5 000 000) почвенно-эрозионная карта. Почвенно-эрозионное картографирование на Среднерусской возвышенности и в Алтайском крае выполнялось также в 50-х гг. Г. П. Сурмачем [71] в период работы комплексной экспедиции АН СССР.

С учетом исследований предыдущего периода и новейших научно-технических разработок последних десятилетий можно констатировать, что теоретической основой рельефообразования является учение об эрозионно-гидрологическом и эрозионно-аккумулятивном процессах. Гидрологический процесс как фактор эрозионно-аккумулятивного процесса определяется, главным образом, характером поступления на поверхность почвы дождевых осадков и талых вод, инфильтрационной способностью почвы и образованием поверхностного (склонового) стока – агента эрозионного процесса. Инфильтрационная способность почвы определяется в первую очередь ее структурно-агрегатным состоянием (особенно водопрочностью почвенных агрегатов), особенностями ее замерзания-оттаивания и влажности почвы. Эрозионно-аккумулятивный процесс является результатом взаимодействия стекающих осадков с почвой. Эрозионно-аккумулятивный процесс сильно зависит от наличия на поверхности растительного покрова и его остатков (стерня), а в лесных насаждениях – мощности и состояния лесной подстилки. Теоретические аспекты эрозионно-гидрологического процесса, кроме упомянутых исследований В. В. Докучаева, П. А. Костычева, рассматривались в работах других ученых [2, 69, 71-74].

Выполненные А. С. Козменко [2] исследования на Среднерусской возвышенности (территория нынешних Тульской, Орловской, частично Липецкой обл.) с составлением первых в России детальных карт овражности, водоносности, лесистости привели ученого к идеям, получившим свое выражение в стройной системе взглядов на причины эрозии и рельефообразования в равнинных условиях. Ему принадлежит обоснование необходимости различать древнюю и современную (антропогенную) эрозию, учитывать роль растительности как важнейшего биотического фактора эрозионно-гидрологического процесса, связывать течение древней эрозии с эпохами оледенения на равнине, а также обусловленности современной эрозии в первую очередь сельскохозяйственной деятельностью. А. С. Козменко впервые обратил внимание на ведущую роль смыва почвы в отличие от тради-

ционной точки зрения об оврагообразовании как ведущего проявления эрозионно-гидрологического процесса. А. С. Козменко принадлежит классификация оврагов по их местоположению, предложена первая в стране классификация почв по степени их смытости. При разработке теории рельефообразования ученым впервые с высокой степенью аргументированности увязано образование лёссов с эрозионно-гидрологическим процессом, что было важным шагом вперед по сравнению с высказанными ранее гипотезами Армашевского – Павлова по поводу лёссообразования в связи с делювиальным процессом.

Дальнейшее развитие взгляды А. С. Козменко получили в работах Г. П. Сурмача [71]. Он создал схему рельефообразования и формирования лёссов в ходе четвертичных эрозионно-аккумулятивных циклов, обусловленных наступлением-таянием ледников на Русской равнине. Его логико-графическая модель формирования склонов и покровных лёссовых пород приведена на рис. 3.1. Оно проходило в 3 цикла, в каждом из которых было 2-3 стадии [71]. Модель отображает то, что образование рельефа и отложение лёсса – это результат единого эрозионно-аккумулятивного процесса. Она позволяет объяснить механизм эрозии и аккумуляции и залегание лёссовых пород на водоразделах.

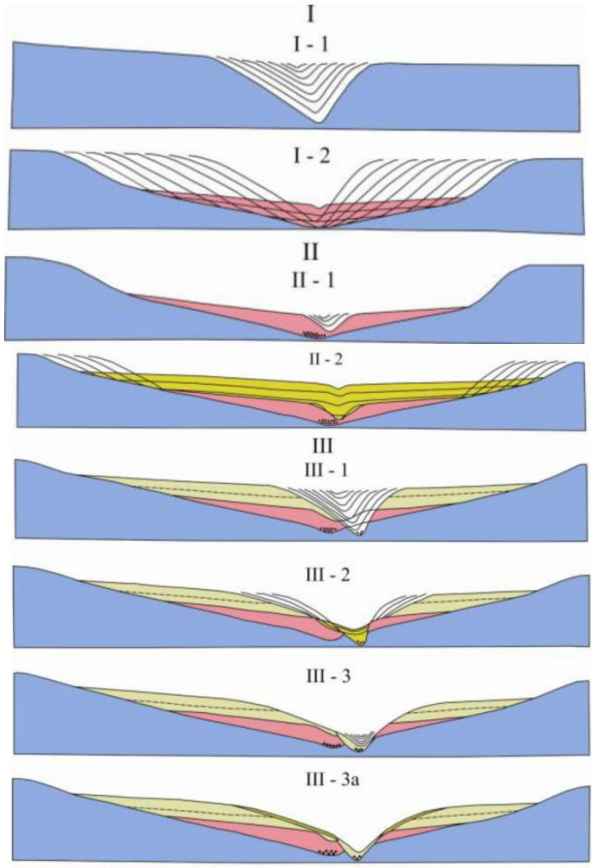


Рис. 3.1. Схема формирования склонов и покровных отложений в результате единого эрозионно-гидрологического процесса:

I – нижнечетвертичный цикл эрозии:

I-1 – стадия углубления русла;

I-2 – стадия сглаживания склона и образования лёссовых пород;

II – среднечетвертичный цикл эрозии:

II-1 – стадия размыва и подмыва инсолируемого берега;

II-2 – стадия сглаживания склонов и образования лёссов;

III – верхнечетвертичный цикл эрозии:

III-1 – стадия размыва и подмыва инсолируемого берега;

III-2 – стадия сглаживания и отложения делювиальных суглинков;

III-3 –размыв суходольной гидрографической сети (до сформирования почв);

III-3а – современный рельеф: а – новейшие делювиальные суглинки

На основе собственных комплексных почвенно-геолого-геоморфологических исследований в Самарском Заволжье, на Среднерусской и Приволжской возвышенностях и в других регионах Г. П. Сурмач обстоятельно описал ход эрозионно-гидрологического процесса на склонах и в гидрографической сети, по-новому изложил условия формирования лёссов, увязал распространение лесной, травянистой растительности с почвообразованием в лесостепи и литологией толщи четвертичных покровных отложений. Он по сути дела решил проблему, которая в течение целого столетия не получала положительного решения.

В. В. Докучаев [1, 69, 72] связывал существование лесостепи с естественными физическими особенностями страны и отмечал нерешенность проблемы. По этой проблеме проходила дискуссия, в которой приняли участие крупнейшие ученые – почвоведы, географы, геоботаники. Е. М. Лавренко и А. В. Прозоровский [78] на основе обобщения взглядов ученых сгруппировали причины безлесья степей следующим образом:

I группа – уничтожение лесов человеком;

II – недостаток осадков при усиленном испарении;

III – засоленность степных почв и подпочв;

IV – мелкоземистость степных почв;

V – равнинный рельеф степей, их слабый дренаж, что, в свою очередь, обусловливает временное (весеннее) затопление степных почв;

VI – незакончившийся процесс облесения лесостепной полосы, в результате которого леса как "более мощные и совершенные" растительные группировки вытесняют степные фитоценозы;

VII группа – циклический характер взаимоотношения леса и степи в лесостепной полосе: дубовый лес поселяется на степных почвах, черноземах и постепенно превращает их в сильнооподзоленные лесные суглинки, малопригодные для существования леса; в связи с этим дубовый лес постепенно исчезает, заменяясь степной растительностью, которая способствует превращению лесного суглинка снова в чернозем, на последнем снова поселяется лес, вытесняя степную растительность, и т. д.

Существующие концепции и схемы развития склонов оказались не в состоянии объяснить появление лёссов на водоразделах и плато и образование разных форм склонов с лёссовым покровом. Г. П. Сурмач [71] подчеркивает, что ни одна из названных

причин не раскрывает того, почему в одинаковых климатических условиях одна часть территории оказалась в прошлом занятой лесом, а другая – степью. Он писал, что "основная причина указанного распределения лесов и степей лесостепи коренится в особенностях литологической (гидрогеологической) основы территории (литологического строения пород), которая возникла в ходе циклического развития эрозионно-аккумулятивных процессов (рельефо- и лёссообразования) в четвертичный период геологической истории Земли. При формировании почвенно-растительных зон в голоцене леса расселились: а) на территориях с маломощным литологически неоднородным, слоистым лёссовым покровом; б) площадях с маломощным ярусом типичного лёсса, подстилаемого породами более водоупорного второго яруса на небольшой глубине или водоупорными коренными породами (например меловым мергелем); в) участках с двучленным строением профиля при залегании сверху маломощного в ряде случаев неоднородного суглинка, представляемого водоупорной, например красно-бурой, глиной; г) слоистом элювии-делювии коренных пород. Во всех случаях верхняя корнеобитаемая толща пород обладает высокой общей влагоемкостью и повышенными запасами продуктивной (легкодоступной для растений) влаги. Здесь образовались серые лесные почвы.

Степная травянистая растительность покрыла участки лесостепи с более мощной толщей однородного лёсса, отличающейся пониженными влагоемкостью и диапазоном активной влаги и, следовательно, меньшими запасами продуктивной влаги в корнеобитаемом слое, ибо просачивающаяся атмосферная влага недостаточно задерживается в этом слое, легко сбрасывается вглубь. На них сформировались черноземы. Промежуточные по характеру гидрологических условий территории стали ареной наиболее ожесточенной борьбы между лесом и степью".

Такое распределение связано с тем, что в ходе рельефообразования и отложения лёссов пониженные участки территории на равнинах, более древние эрозионные выработки и пониженные пологие склоны в пределах возвышенностей покрылись мощной толщей относительно однородных суглинистых или тяжелосуглинистых отложений. На более крутых и высоких склонах возвышенностей сформировались лёссы малой мощности, отличающиеся значительной слоистостью и неоднородностью литологического

строения. Слоистые отложения с чередованием прослоек различного гранулометрического состава обладают повышенной общей влагоемкостью и значительно большим содержанием легкодоступной для растений влаги по сравнению с однородными грунтами. Слоистые грунты, ввиду действия менисковых сил представляют собой намного большее препятствие для просачивания воды вглубь, чем однородные. К тому же под маломощным лёссовым плащом залегают слоистые песчано-глинистые отложения мощностью около 1,0-2,5 м, образовавшиеся в раннечетвертичное время, которые являются водоупором, способствующим формированию верхнего горизонта грунтовой воды или верховодки. Таким образом, возникли существенно отличающиеся между собой гидрогеологические условия, что определило соответствующее распределение древесной (лесной) и травянистой (степной и луговой) растительных формаций, а следовательно, и генезис почв.

Г. П. Сурмач считал, что главной причиной мозаичного распределения древесной и травянистой растительных формаций и соответствующих им почв является различная влагоемкость слоистых литологически неоднородных и мощных более однородных толщ. Формирование серых лесных почв обусловлено благоприятным литологическим строением корнеобитаемой и подстилающей толщи почвогрунта (активная зона водообмена), способной удерживать гравитационную влагу и обеспечивать водой лесную растительность. Как отмечали Е. А. Афанасьева [79] и А. Ф. Большаков [80] при двучленном строении верхнего яруса лёсса формируется горизонт капиллярно-подвешенной воды, что улучшает гидрологические условия местообитания растительности. Связь распространения лесов с неоднородным литологическим строением корнеобитаемой и подстилающей толщи почвогрунта, а степей – с мощной однородной толщей лёсса является всеобщей. Кроме лесостепной зоны лес продвинулся по суходольной гидрографической сети далеко в сухую степь и даже в полупустыню.

Распространение байрачных (балочных) лесов связано с особенностями литологического строения пород, а также с повышенным увлажнением берегов балок за счет снега и грунтового подтока влаги. Лес иногда выходит из балок по ложбинам на склоны, где залегают близко от поверхности или выклиниваются песчано-глинистые образования при наличии водоупоров. Однако на берегах балок, сложенных мощными лёссовыми отложениями, лес не посе-

лялся и под луговой растительностью образовались черноземы.

Таким образом, Г. П. Сурмач доказал, что синтез взаимодействующих факторов и процессов четвертичного времени, воссоздание картины формирования рельефа и становления литогенной (гидрогеологической) основы природных ландшафтов дают ключ к лучшему пониманию дальнейшего развития антропогенных ландшафтов и к научному обоснованию мер по охране природы, включая меры по защите почв от эрозии. Рассмотрение процесса рельефообразования и отложения лёссов как единого эрозионно-аккумулятивного процесса позволило Г. П. Сурмачу решить важную проблему распределения в лесостепи лесов и степей и образования черноземов и серых лесных почв. Эта теория также объясняет произрастание в степной зоне лесов на водоразделах и байрачных лесов в суходольной гидрографической сети. Она помогает теоретически осмыслить грандиозные процессы эрозионного разрушения возвышенностей и формирования лёссовых пород (коры выветривания), т. е. литогенной основы современных ландшафтов, а также более полно и правильно оценить большую роль растительности (биологический фактор) в рельефообразовании. Наиболее глубокое понимание причинно-следственных связей и результатов взаимодействия различных факторов при циклическом развитии эрозионно-аккумулятивных процессов открывает перспективу направленного регулирования этих процессов в условиях хозяйственной деятельности, более продуктивного использования земель и более правильного подхода к охране окружающей среды.

Разработки Г. П. Сурмача помогают выявить особенности формирования грунтовых вод на участках с сетью лесных полос. При гидрогеологическом обследовании территории можно прогнозировать характер формирования нового верхнего горизонта воды или устойчивой верховодки при проектировании противоэрозионного комплекса, предвидеть возможность продвижения грунтового потока вниз по склону, а также выклинивания его и использования этой воды растениями. На серых лесных почвах более благоприятные условия для продвижения грунтового потока от лесных полос вниз по склону, чем на черноземах. При наличии мощной толщи однородного лёсса вода просачивается преимущественно вертикально вниз.

3.1.2. Функция формы склона и смыв почвы

Развитие теории Г. П. Сурмача продолжил его ученик, доктор сельскохозяйственных наук Е. А. Гаршинёв. Им уточнены условия формирования эрозионно-аккумулятивных форм рельефа, разработана логико-графическая схема эволюции склонов в ходе эрозионно-аккумулятивного процесса (рис. 3.2) [12], обосновано, что эрозионный промоинно-овражный размыв спонтанно и последовательно проходит стадии от обрывистых откосов к осыпным склонам делювиального смыва и аккумуляции.

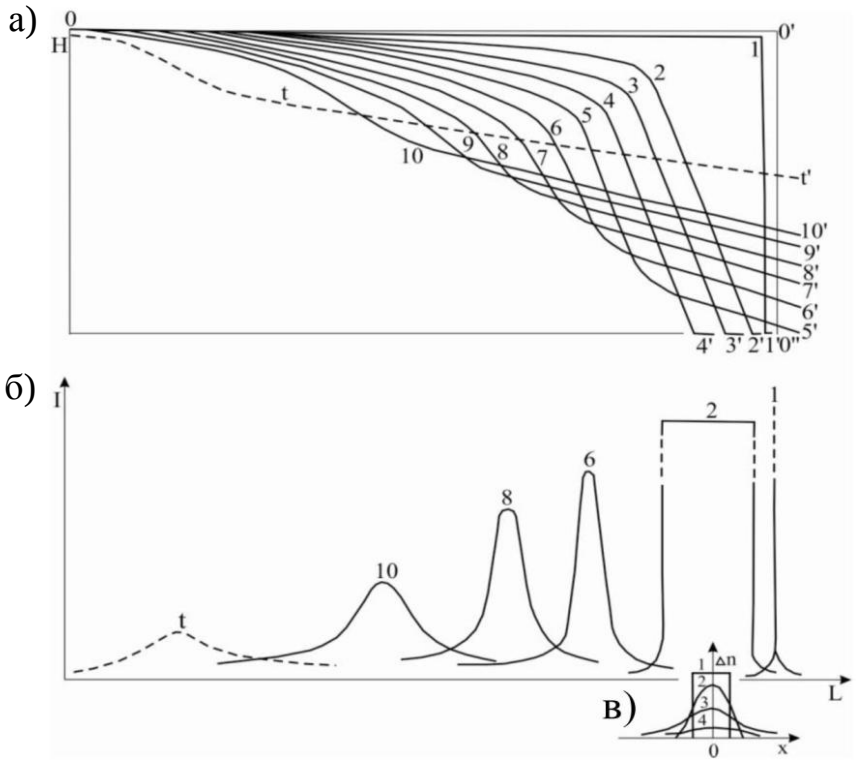


Рис. 3.2. Логико-графическая схема эволюции отметок H (а) и уклонов I (б) поверхности склона в ходе эрозионно-аккумулятивного процесса (L – длина склона). Диффузия избыточных носителей с поверхности субстрата (в)

На этой основе впервые показано, что форма склонов является адекватным выражением эрозионно-аккумулятивного процесса и им предложено выражать функцию формы склона посредством логистического уравнения. Таким образом, им найдено универсальное математическое выражение для описания выпукло-вогнутых склонов как результата проявления эрозионно-гидрологического процесса, что вполне согласуется с воззрениями Д. Л. Арманда [33] и Л. Кинга [17] о всеобщности такого образования склонов на суше Земли.

Е. А. Гаршинёвым [12] разработана теория и созданы математические модели эрозионно-аккумулятивного процесса. Они доведены до инженерного расчета и реализованы пакетом при-

кладных программ. В основу разработки модели эрозионно-гидрологического процесса он положил вывод о том, что форма склона, образующегося в результате эрозионно-аккумулятивного процесса, есть тождественно-адекватный результат данного процесса, т. е. функция формы склона и функция эрозионно-аккумулятивного процесса тождественны. Смыв приводит к удалению субстрата с поверхности склона, в результате чего она понижается и склон приобретает вид кривой, форма которой в точности соответствует слою удаленного эрозией материала. Также аккумуляция мелкозема повышает поверхность склона, и его форма в точности соответствует слою аккумулированного наноса. Но если это так, то форма склона есть не что иное, как в неявном виде геометрический (геоморфологический) образ (модель) функции эрозии – аккумуляции. Иными словами, математическое выражение функции формы склона является адекватным выражением функции эрозионно-аккумулятивного процесса.

Им впервые установлено, что вся совокупность эрозионно-аккумулятивных склонов может быть описана универсальной функцией – логистической [12]:

$$H = (H_{max} - H_{min})/(1 + exp(-a + bL)) + H_{min}, \qquad (1)$$

где H, H_{max}, H_{min} – текущая отметка, максимальная и минимальная асимптоты поверхности склона; L – расстояние от водораздела; a и b – параметры.

Уравнение (1), описывающее форму склона, имеет широкую область практического применения и позволяет определять многие морфометрические характеристики рельефа: уклон, расстояние от водораздела до точки перегиба, расстояние до бровки и точки перехода берегового склона в днище. Последние характеристики более корректны при использовании понятия пластики рельефа для картографирования генетически однородных элементов рельефа и составления почвенных карт.

Расчеты рассмотренных морфометрических характеристик необходимы во многих областях прикладной деятельности, в т. ч. в противоэрозионной лесомелиорации при планировании и проектировании противоэрозионных насаждений, определении границ земельных фондов и укрупненных параметров систем лесополос на водосборах (их количество и протяженность, лесистость и т. п.), составлении бассейновых и иных схем противоэрозионных мероприятий, разработке нормативов, типовых проектных

решений и т. д. Выражение (1), в отличие от всех известных уравнений, позволяет получать "точечные", а не интервальные (для отрезков склона) оценки смыва, строить по ним карты изолиний, а не контуры интервалов его величин.

Полученные результаты позволяют использовать логистическую функцию для решения многих задач прикладной геоморфологии, ландшафтоведения, почвоводоохранного земледелия – получать на основе расчетов геологическое строение зоны аэрации и положение уровней грунтовых вод, выполнять комплексное ландшафтное районирование территории, прогнозировать естественную и антропогенную эволюцию ландшафтов и т. п.

В связи с тем, что закон, описывающий форму склона и эрозионно-аккумулятивный процесс, един, Е. А. Гаршинёвым разработано уравнение для расчета смыва [12]:

$$W_m = L[K]h^s(\varphi_1 P^2)^m L^n, \qquad (2)$$

где L – коэффициент, учитывающий размерность, пропорциональность и противоэрозионную стойкость агрофона; $[K]$ – произведение коэффициентов, учитывающих почвенные условия и эффективность почвозащитных приемов; h – слой стока; $\varphi_1 = bc\varphi/\Delta P$; $\varphi = exp(-bL)$; $c = exp(a)$; $P = \Delta H \cdot P_D - \Delta H[1 - (H - H_{min})/\Delta H] = \Delta H/(1 + c\varphi)$; $\Delta H = H_{max} - H_{min}$; $P_D = 1/(1 + c\varphi)$; m, n, s – параметры ($m \approx 1\ldots2$; $n \approx 0{,}5\ldots1$; $s = 0{,}96$).

Использование уравнения (2) и его первых четырех производных позволяет определять аналитически геоморфологические характеристики рельефа, выполнять геоморфологическое картографирование и районирование территории, аналитически определять границы ландшафтных поясов и т. п. Использование логистической функции позволяет строить карты текущих значений уклонов и смыва почв (ранее такие карты строились только по дискретным оценкам этих характеристик), выполнять расчеты противоэрозионных рубежей (в т. ч. стокорегулирующих лесополос) и систем противоэрозионных мероприятий.

Это позволило разработать оригинальную систему автоматизированного проектирования (САПР) противоэрозионных мероприятий [81]. САПР – это совокупность технологических действий (операций) с применением ЭВМ и иных электронных средств, обеспечивающих использование баз данных, математических моделей, пакетов прикладных программ, выполнение в автоматическом и полуавтоматическом режимах инженерных

расчетов, машинной графики, формирование текстовой документации по всему циклу проектной разработки систем агролесомелиоративных и иных противодеградационных мероприятий. САПР в 3-4 раза сокращает затраты на выполнение трудоемких графических работ и в 1,5-2 раза увеличивает производительность труда при проектировании.

3.2. Эрозионно-гидрологический процесс как фактор деградации и опустынивания

3.2.1. Общие положения

Выполненные во ВНИАЛМИ разработки по аспектам теории рельефообразования составляют единое целое с разработками в области гидрологических процессов. Выдающаяся роль в этом принадлежит Г. П. Сурмачу. Он в 1958 г. организовал в лесостепной, степной и полупустынной зонах стационарные исследования в четырех пунктах опытной сети ВНИАЛМИ в Орловской, Самарской и Волгоградской обл., где исследования проводятся до настоящего времени. Особенно важны в этом отношении экспериментальные и теоретические исследования факторов просачивания и стока дождевых и 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.

Изложенные выше теоретические основы рельефообразования, эрозионно-гидрологического и эрозионно-аккумулятивного процессов и отложения лёссов позволили определить наиболее перспективные направления, пути и средства воздействия на них и разработать высокоэффективные приемы и технологии управления эрозионно-гидрологическим процессом. Они позволяют лучше понять ландшафтные особенности территории и использовать их в практических целях.

Исследование роли взаимодействующих факторов и процессов четвертичного времени, воссоздание картины формирования рельефа и становления литогенной (гидрогеологической) основы природных ландшафтов дают ключ к лучшему пониманию дальнейшего развития антропогенных ландшафтов и к научному обоснованию мер по охране природы, включая меры по защите почв от эрозии. Наиболее глубокое понимание причинно-следственных связей и результатов взаимодействия различных факторов эрозионно-аккумулятивных процессов открывает перспективу направленного регулирования этих процессов в условиях хозяйственной деятельности, более продуктивного использования земель и более правильного подхода к охране окружающей среды.

Знание генезиса серых лесных и черноземных почв лесостепи и их приуроченности к различным территориям очень важно для развития теории почвообразовательного процесса. Поскольку корнеобитаемая толща материнских пород серых лесных почв способна содержать больше доступной для растений влаги, то на этих почвах при их окультуривании и полном обеспечении растении питательными веществами можно получить такие же (или более высокие) урожаи, как и на соседних черноземных массивах.

Сравнительно небольшое варьирование в литологическом строении материнских и подстилающих пород в пределах лесостепи и степи определяет биологическую продуктивность травянистой и культурной растительности. Поэтому изучение этих свойств указанных пород будет иметь большое значение для сельскохозяйственного производства.

Теория рельефообразования позволяет глубже уяснить взаимосвязь леса с почвенно-грунтовыми условиями и более обоснованно подойти к оценке лесопригодности (лесорастительных условий) того или иного участка территории, где предполагается создание лесонасаждений. Наилучшие условия для их произрастания – это слоистые отложения с чередованием прослоев более легкого (песок, супесь) и тяжелого гранулометрического состава, а также профиль почв с двучленным строением, когда верхний член представляет собой субстрат легкого гранулометрического состава, а нижний – средний или тяжелый суглинок или глину; наихудшие – отложения, имеющие однородный литологический состав.

3.2.2. Влияние природных, антропогенных факторов и их взаимодействия на формирование поверхностного стока талых вод

Современное состояние оценки роли природных факторов в формировании стока талых вод

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. 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 [82], исследуя этот вопрос в Воронежской обл., пришли к выводу, что с увеличением снегозапасов коэффициент стока увеличивается. С. И. Небольсин и П. П. Надев [83], 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 [84] 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 [85] пришли к выводу, что снегозапасы прямо влияют на сток весеннего половодья. Г. П. Сурмач [5] отмечает, что не всегда можно выделить в чистом виде влияние снегозапасов на сток, иногда накладывается действие 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 *Х*, которая выражается уравнением $У = 0{,}36Х + 35{,}7$. 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 увеличения 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 [86] на качественном уровне – слабый, умеренный и т. д.

Е. В. Полуэктов [87-89] провел подобный анализ для условий североприазовских черноземов Ростовской обл. 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 глубину. 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 увлажне-

нии. 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.

Обоим ученым 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 [86] 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 [90] 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:

$$У = S - P_o(1 - e^{s/p}), \qquad (3)$$

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

$$P_o = 750e^{-0,051we} - 0,051WL. \quad (4)$$

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 (4) 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 [91, 92] выявил важную роль теплофизического взаимодействия талой воды с мерзлой почвой. Последующие исследования этого вопроса углубили понимание сути процесса впитывания талой воды в мерзлую почву [93-95]. Наибольший интерес представляют исследования И. Л. Калюжного, К. К. Павловой и С. А. Лаврова [96], 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 [40] 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. Формирование "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 [97], 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 [98] 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

$$C = 3{,}23 \cdot 10^{-2} \cdot S^{0{,}85} \cdot X^{0{,}7} \cdot r^{0{,}58} \cdot K^{1{,}15} \cdot \Sigma t \cdot T^{0{,}25}. \qquad (5)$$

В уравнении (5) 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 [99] разра-

ботали прогноз коэффициентов стока. Они предложили рассчитывать их по уравнению

$$K_{пр} = (\alpha X^n - вX - cH + d)x(1 + 0{,}0000055P^2_{ос}), \qquad (6)$$

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 (6) 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 [38, 90]. И 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 [100] предлагает оценку изменения поверхностной составляющей речного стока осуществлять на основании зависимости

$$\alpha = f(U_t, I), \qquad (7)$$

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 (7) не может правильно отражать связь поверхностного стока с природными факторами по следующим причи-

нам. 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 [5, 6, 101]. Г. П. Сурмач [5] 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 [102] 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:

$$W_n = 14{,}7\sqrt{h},\ \text{км}^3; \qquad (8)$$

$$W_n = 0{,}94h + 54,\ \text{км}^3. \qquad (9)$$

Из уравнений (8), (9) 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 [103], 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 [104], 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 [105], 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 [106] 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 [107], "объем весеннего половодья (притока воды в водохранилище) определяется по многим постоянным и переменным 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, влаж-

ность 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 реках, – 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

$$l_i = f(\sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i(h)\Theta i), \qquad (10)$$

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 (10) 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 в основном используются методы расчетов косвенных показателей влажности почвы к осени, а затем производятся вычисления прибавки к ней в период оттепелей по уравнению

$$W = X_n + (X - Z)_k + W_o, \qquad (11)$$

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:

$$Y(j) = S(j) - P(j)th[S(j)/P(j)], \qquad (12)$$

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 (12) 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 [108]) предложено определять величины максимального расхода стока весеннего половодья разной вероятности превышения по уравнению

$$Q_{max} = Q_0 + A\frac{S}{\tau}, \qquad (13)$$

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 (13) 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 (12), (13) 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.

Во ВНИАЛМИ (сейчас ФНЦ агроэкологии РАН) имеется очень большой уникальный экспериментальный материал, которого нет ни у одного научного учреждения в стране и в мире. Начиная с 1958 г. в институте и его опытной сети были организованы обширные исследования по изучению процессов формирования стока талых вод с целью разработки противоэрозионных мероприятий. Эти работы проводились в разных природных зонах: лесостепи, степи, полупустыне. Исследования проводились и проводятся до настоящего времени в Орловской, Самарской и Волгоградской обл. Анализ и обобщение результатов исследований ВНИАЛМИ, а также материалов других научных учреждений позволили получить новые важные теоретические и практические выводы. В результате теоретических и экспериментальных исследований впервые в мире нами был сформулирован и обоснован *закон лимитирующих факторов поверхностного стока* и разработана методика его высокоточного прогноза. Анализ данных показал, что на величину поверхностного стока существенно влияют только 3 фактора: снегозапасы, влажность почвы и глубина ее промерзания. Всеми остальными факторами можно пренебречь. Даже продолжительность (интенсивность) снеготаяния не влияет на величину стока. Рассмотрим эти материалы более подробно.

Влияние природных факторов на формирование стока на серых лесных почвах лесостепи ЦРНЗ

В этой зоне для анализа использовались материалы Е. А. Гаршинёва (1959, 1960, 1964 и 1966 гг.); А. Т. Барабанова, М. М. Ломакина, Е. Я. Тубольцева (1967-1975 гг.); Н. Е. Петелько (1976-1979 гг.); В. П. Борца (1980 г.); А. И. Петелько (1981-2016 гг.), В. П. Борца (1981-1984 гг.); А. Т. Барабанова, Ю. Н. Коблева,

А. И. Петелько, В. А. Ивановой (1985-2016 гг.), полученные за 57 лет наблюдений на Новосильской ЗАГЛОС им. А. С. Козменко – филиале ФНЦ агроэкологии РАН (Орловская обл.). Наиболее мощное воздействие на формирование стока оказывали снегозапасы, глубина промерзания и влажность почвы. Рассмотрим их влияние.

Запасы воды в снеге. Очень часто объем поверхностного стока связывают с запасами воды в снеге на водосборе (со снегозапасами). Чем больше снега, тем больший ожидают сток. Создаются противопаводковые комиссии, они осуществляют большие подготовительные работы и расходуют впустую очень много средств – материальных и финансовых.

Прямой зависимости поверхностного стока талых вод от снегозапасов, т. е. больше снега – больше сток, нет (табл. 3.1). В многоснежные зимы (снегозапасы свыше 100 мм) сток на рыхлой пашне в отдельные годы (1959, 1967) формировался очень большой –

Таблица 3.1

Снегозапасы и поверхностный сток талых вод на серых лесных почвах лесостепи, Орловская обл.

Год	Снегозапасы, мм	Сток, мм	Год	Снегозапасы, мм	Сток, мм
рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6
Многоснежная зима					
1959	146	108	1959	135	106
1960	136	81	1960	150	117
1963	116	61	1963	115	71
1964	121	58	1964	113	91
1967	186	146	1966	105	3
1968	169	0	1967	186	186
1970	192	83	1968	145	26
1971	154	52	1970	221	94
1976	137	0	1977	149	20
1977	138	12	1978	177	20
1979	128	37	1979	135	45
1980	135	29	1980	153	42
1981	162	0	1981	132	15
1982	100	2	1982	100	5
1985	128	0	1985	119	2
1987	149	27	1986	175	36
1988	118	21	1987	160	40
1994	139	40	1988	123	42
1995	114	0	1994	142	50

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4	5	6
1999	144	0	1995	118	4
2005	115	0	2003	152	71
2006	137	0	2005	115	0
2010	106	0	2006	111	0
2011	122	0	2009	102	0
2013	122	0			
Среднее	137	30	Среднее	139	45
Малоснежная зима					
1961	32	7	1961	22	12
1962	22	13	1962	23	21
1965	70	51	1965	60	46
1966	77	4	1969	80	51
1969	66	24	1971	81	39
1972	56	15	1972	56	15
1973	62	29	1973	53	31
1974	50	29	1974	49	44
1975	86	0	1975	89	0
1978	91	0	1976	89	0
1983	97	2	1983	91	27
1984	41	12	1984	67	18
1986	77	33	1989	52	0
1989	55	0	1990	49	25
1990	44	23	1991	89	52
1991	84	34	1992	85	0
1992	88	0	1993	45	14
1993	42	17	1996	89	26
1996	81	29	2004	97	0
1997	56	1	2007	62	0
1998	48	0	2008	83	0
2000	57	0	-	-	-
2001	81	0	-	-	-
2002	58	0	-	-	-
2003	96	46	-	-	-
2004	86	0	-	-	-
2007	79	0	-	-	-
2008	76	0	-	-	-
2009	97	0	-	-	-
2012	86	0	-	-	-
2014	35	0	-	-	-
2015	58	0	-	-	-
Среднее	67	11	Среднее	67	20

108 и 146 мм при снегозапасах 146 и 186 мм, а в другие годы (1968, 1981) при снегозапасах 162 и 169 мм стока совсем не было. Так, из 25 многоснежных зим 11 лет сток не сформировался, а в остальные годы он был средний и очень большой. В малоснежные зимы при снегозапасах меньше 100 мм сток не сформировался 13 лет из 32, три года он был незначительный, а в остальные годы величина его была на среднем уровне при снегозапасах, варьирующих от 22 до 97 мм. Так, при запасах воды в снеге 86 и 91 мм сток не сформировался, а при снегозапасах 70 и 96 мм он был соответственно 51 и 96 мм. На уплотненной пашне величина стока также по годам колебалась независимо от снегозапасов. В многоснежные зимы, например, в 1959 г. при запасах воды в снеге 135 мм сток был 106 мм, в 1979 г. при таких же снегозапасах он был лишь 45 мм, в 1960 г. при снегозапасах в 150 мм величина стока составила 117 мм, а при снегозапасах 102-115 мм (2005, 2006, 2009 гг.) сток вообще не сформировался. В малоснежные зимы при запасах воды в снеге 91 и 97 мм стока не было, а при снегозапасах 49 мм сформировался сток 44 мм. В многоснежные годы сток отсутствовал 3 года из 24, а в малоснежные – 7 лет из 21.

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 38,4. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 0,43 и 35,4. 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. Это будет рассмотрено ниже.

Глубина промерзания почвы. Связь стока с глубиной промерзания почвы следующая. Если почва талая или она промерзла не глубже 50 см (табл. 3.2), сток не формируется независимо от уровня увлажнения почвы, снегозапасов и продолжительности снеготаяния. С такими условиями промерзания почвы были 34 года из 52 (1966, 1968, 1975, 1977, 1978, 1980, 1981-1983, 1985, 1989, 1992, 1995, 1997-2002, 2004-2016). Другие факторы изменялись в широком диапазоне. Запасы воды в почве (в слое 0-50 см) в эти годы колебались от 123 до 248 мм, в снеге – от 35 до 177 мм, а продолжительность

Таблица 3.2

Показатели стока талых вод и факторов, обусловливающих его формирование на серых лесных почвах лесостепи, Орловская обл.

Год	Сток, мм	Запас воды, мм		Глубина промерзания почвы, см	Продолжительность снеготаяния, сут.	Сток, мм	Запас воды, мм		Глубина промерзания почвы, см	Продолжительность снеготаяния, сут.
		в почве	в снеге				в почве	в снеге		
	рыхлая пашня					уплотненная пашня				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Год без стока										
1966	0	157	108	0	18	1	189	101	0-10	20
1968	0	123	150	29	11	0	124	161	0-8	11
1975	0	154	86	30	14	-	-	-	-	14
1976	0	123	113	130	8	-	-	-	-	-
1977	2	132	114	30	22	0	172	174	45	22
1978	0	201	177	45	29	0	163	194	50	29
1980	0	153	158	30	13	0	152	153	35	13
1981	0	172	104	38	18	0	233	122	0	18
1982	0	184	101	50	23	-	-	-	-	-
1983	0	166	111	40	13	-	-	-	-	-
1984	3	129	51	120	18	-	-	-	-	-
1985	0	173	120	10	10	2	166	113	10	10
1989	0	168	41	0	11	-	-	-	-	
1992	0	169	88	17	14	0	167	85	0-17	14
1995	0	240	114	25	20	0	165	121	25	20
1997	1	247	55	45	8	-	-	-	-	-
1998	0	197	48	20	10	-	-	-	-	-
1999	0	178	144	0	28	-	-	-	-	-
2000	0	166	57	20	21	-	-	-	-	-
2001	0	210	80	0-5	24	-	-	-	-	-
2002	0	185	58	8	26	-	-	-	-	-
2004	0	220	86	5-20	6	0	258	97	15-20	6
2005	0	166	115	1-12	15	0	196	115	26	15
2006	0	205	137	51	8	-	-	-	-	-
2007	0	201	79	0	15	-	-	-	-	-
2008	0	184	76	25	9	-	-	-	-	-
2009	0	209	97	22	-	-	-	-	-	-
2010	0	192	89	35	35	-	-	-	-	-
2011	0	156	122	0	15	-	-	-	-	-
2012	0	160	86	18	9	-	-	-	-	-
2013	0	171	123	22	10	-	-	-	-	-
2014	0	203	35	0-19	5	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2015	0	172	58	18		-	-	-	-	-
Год со стоком										
1964	52	151	211	60	10	-	-	-	-	-
1967	150	248	196	76	20	55	156	127	80	20
1969	22	175	52	182	23	46	173	77	165	23
1970	82	183	191	137	23	96	171	203	75	23
1971	52	165	154	100	18	42	188	74	100	18
1972	22	166	60	160	22	15	157	37	100	22
1973	31	190	70	97	11	38	168	63	100	11
1974	50	193	64	124	3	44	216	49	104	3
1979	41	174	137	68	23	64	167	132	80	23
1986	32	175	80	110	11	25	180	77	110	11
1987	33	152	153	69	14	42	118	149	69	14
1988	21	137	118	60	10	29	161	132	60	10
1990	21	190	44	68	5	-	-	-	-	-
1991	34	172	84	84	13	52	214	90	84	13
1993	17	174	42	83	12	14	151	45	83	12
1994	37	156	136	68	14	50	269	142	68	14
1996	29	164	81	80	15	25	153	89	80	15
2003	26	208	96	52	17	71	230	152	110	17

снеготаяния – от 6 до 29 дней, т. е. при варьировании всех факторов в широком диапазоне сток талых вод при глубине промерзания меньше 50 см не формируется. При промерзании почвы свыше 50 см формируется сток разной величины, он зависит не от дальнейшего увеличения глубины промерзания почвы, а от уровня ее увлажнения и запасов воды в снеге.

В годы с промерзанием почвы на глубину 52-182 см (1964, 1967, 1969-1974, 1979, 1986-1988, 1990, 1991, 1994, 1996, 2003 гг.) всегда формировался сток и величина его колебалась от 17 до 150 мм вне зависимости от глубины промерзания почвы. При глубине ее промерзания 182 см сток был 22 мм, при промерзании на 76 см сформировался сток 150 мм, при промерзании на глубину 165 см сток составил 46 мм, при глубине 80 см – 55 мм и т. д. (см. табл. 3.2). Парный коэффициент корреляции связи стока с глубиной промерзания составил всего 0,04, а стандартная ошибка – 32,2. В условиях глубокого промерзания почвы сток формируется в зависимости от запасов воды в почве и снеге. В почве запасы воды в эти

годы колебались от 151 до 248, а в снеге – от 42 до 211 мм.

Влажность почвы. Влагозапасы в почве как фактор стока следующим образом воздействуют на него при глубине ее промерзания свыше 50 см. В годы, когда запасы воды в слое почвы 0-50 см менее 123-129 мм (1968, 1976, 1984 гг.), стока не было независимо от снегозапасов и глубины промерзания почвы. Запасы воды в снеге изменялись в широком диапазоне (51-113 мм), а глубина промерзания была большая (120-130 см). То есть, если в почве перед снеготаянием запасы влаги низкие, то даже при очень глубоком промерзании и больших снегозапасах она сохраняет высокую впитывающую способность и сток не формируется. Таким образом, лимитирующим фактором формирования стока в эти годы был уровень увлажнения почвы. А в 1968 г. при низком уровне увлажнения (123 мм) почва была еще и талая и лишь местами промерзала до 20-30 см. В том году лимитирующими были два фактора: увлажнение почвы и глубина промерзания. Поэтому сток также не формировался.

Множественный корреляционно-регрессионный анализ связи стока на рыхлой пашне $У_з$ с запасами влаги в почве $W_п$ и снеге перед снеготаянием $W_с$ при промерзании почвы на глубину свыше 50 см позволил получить следующее уравнение регрессии (R = 0,93, $M_{ух}$ = 12,4):

$$У_з = –141 + 0{,}80W_п + 0{,}38W_с. \qquad (14)$$

Коэффициенты уравнения и график на рис. 3.3а показывают, что сток в большей степени зависит от увлажнения мерзлой почвы, чем от запасов воды в снеге.

Анализ связи стока на уплотненной пашне с указанными природными факторами показал, что при глубине промерзания почвы до 50 см сток обычно не формируется. Таких лет было 11 из 27 исследуемых. Запасы воды в почве в эти годы колебались от 124 до 269 мм, а снегозапасы – от 97 до 194 мм.

В годы с глубиной промерзания почвы свыше 50 см и запасами воды в ней (в слое 0-50 см) более 156 мм величина стока колебалась от 10 до 96 мм. Связь стока с глубиной промерзания почвы в эти годы также отсутствует. Парный коэффициент корреляции составляет всего 0,13, а стандартная ошибка 42,5.

Для выявления связи стока $У_п$ с запасами воды в почве $W_п$ и снеге $W_с$ был применен множественный корреляционно-регрессионный анализ и получено уравнение регрессии (R = 0,81, $M_{ух}$ = 13,3)

$$У_n = –16,3 + 0,15W_n + 0,34W_c. \quad (15)$$

Значение коэффициентов уравнений (14), (15) и рис. 3.3б свидетельствуют о том, что более важную роль в формировании стока играют запасы воды в снеге, чем увлажнение мерзлой почвы.

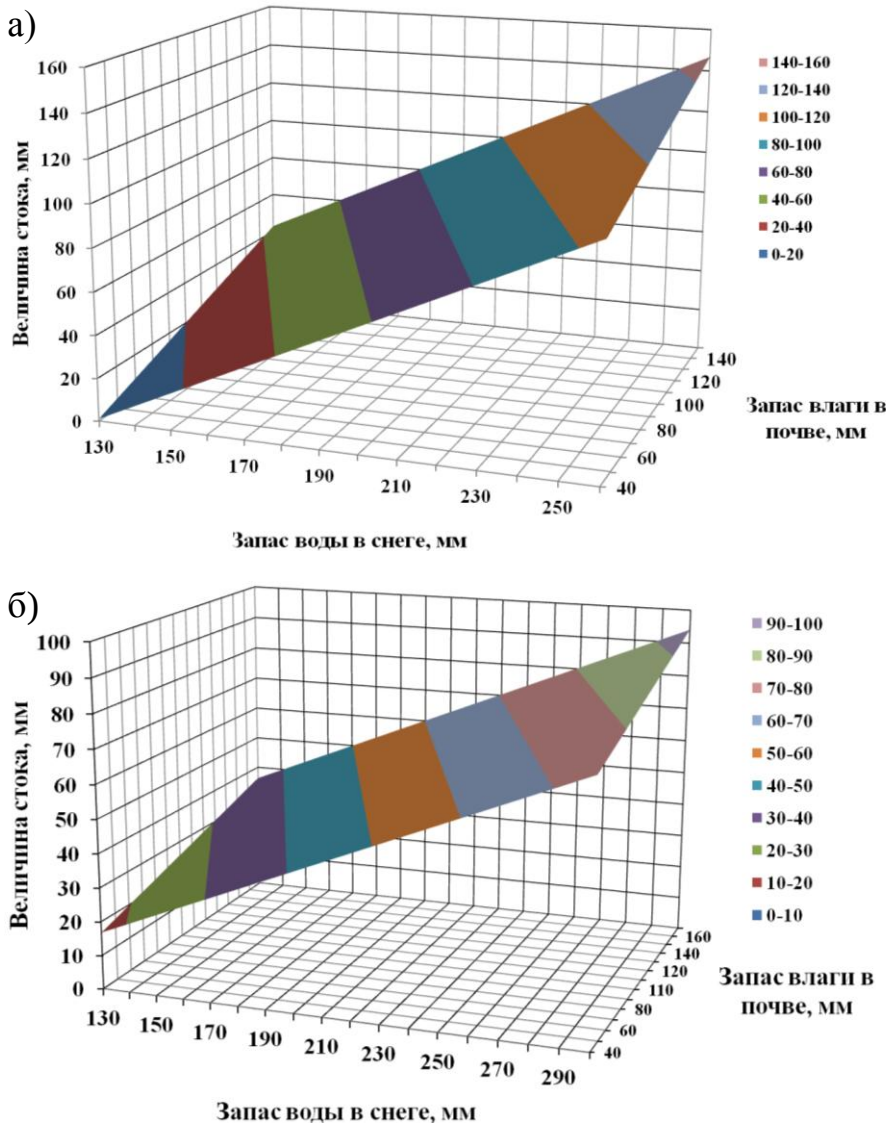


Рис. 3.3. Трехмерная модель связи стока талых вод с запасами воды в почве и снеге в лесостепи (а – на рыхлой, б – на уплотненной пашне)

Расчет стока по уравнениям (14), (15) дает довольно близкую сходимость с экспериментальными данными (табл. 3.3).

Таким образом, обобщение и анализ материалов по влиянию на сток талых вод природных факторов в лесостепи Центрального района Нечерноземной зоны показали, что важнейшими факторами формирования стока являются снегозапасы, увлажнение и глубина промерзания почвы перед снеготаянием. Влияние этих факторов на сток происходит в сложном взаимодействии. Снегозапасы напрямую не влияют на сток, но от их количества зависит его величина и связано это с глубиной промерзания и увлажнением почвы. Глуби-

на промерзания специфически влияет на формирование стока. Если почва талая или она промерзла на глубину не более 50 см, то сток не формируется, так как она обладает высокой впитывающей способностью, обеспечивающей поглощение всей снеговой воды. При промерзании почвы свыше 50 см сток совсем не зависит от его глубины, он формируется в зависимости от запасов влаги в верхнем (0-50 см) слое почвы и запасов воды в снеге.

Таблица 3.3

Экспериментальные и рассчитанные по уравнениям (14), (15) величины стока на серых лесных почвах лесостепи, мм

Год	Экспери-ментальные	Рас-четные	Отклоне-ния		Год	Экспери-ментальные	Рас-четные	Отклонения	
			мм	%				мм	%
рыхлая пашня					уплотненная пашня				
1964	52	60	8	15	1964	-	-	-	-
1967	150	131	–19	13	1967	55	50	–5	9
1969	22	19	–3	14	1969	46	36	–10	22
1970	82	78	–4	5	1970	96	79	–17	18
1971	52	49	–3	6	1971	-	-	-	-
1972	22	15	–7	32	1972	15	20	5	33
1973	31	38	7	22	1973	38	30	–8	21
1974	50	37	13	26	1974	-	-	-	-
1979	41	50	9	22	1979	64	54	–10	16
1986	32	29	–3	9	1986	-	-	-	-
1987	33	39	6	18	1987	-	-	-	-
1988	21	14	–7	33	1988	29	53	24	83
1990	21	28	7	33	1990	-	-	-	-
1991	34	29	5	15	1991	52	47	–5	10
1993	17	14	–3	18	1993	14	22	8	57
1994	37	36	–1	3	1994	50	72	22	44
1996	29	22	–7	24	1996	25	37	12	48
2003	46	61	15	33	2003	71	70	–1	1

Влияние природных факторов на формирование стока на серых лесных почвах и черноземах ЦЧО

Для анализа связи стока талых вод с природными факторами (запасы воды в снеге и почве в слое 0-50 см перед снеготаянием, глубина промерзания почвы и продолжительность снеготаяния) на серых лесных почвах и черноземах ЦЧО были использованы материалы М. М. Ломакина [109]; Н. Ф. Гончарова; В. А. Поря-

дина [110]; А. И. Крупчатникова, А. Т. Барабанова, В. С. Ананьева, Н. Г. Сапрыкина, Н. Г. Перелейводы [111], Е. А. Гаршинёва, Т. Я. Зарудной [65] (табл. 3.4, 3.5). К сожалению, в этой зоне не удалось увеличить ряды наблюдений за стоком, так как были прекращены регулярные исследования закономерностей его формирования. Полученные материалы были опубликованы автором [63]. В настоящую работу мы включаем их для того, чтобы у читателя сложилось более полное представление о влиянии природных факторов на сток талых вод во всех зонах Русской равнины европейской части Российской Федерации. Множественный корреляционно-регрессионный анализ связи стока с рыхлой и уплотненной пашни с перечисленными выше факторами как на черноземах, так и на серых лесных почвах показал, что с продолжительностью снеготаяния она слабая (парные коэффициенты корреляции колеблются от –0,40 до 0,64). Причины этого были проанализированы выше.

Таблица 3.4

Показатели стока с зяби и факторов, обусловливающих его на серых лесных почвах Курской обл.

Год	Сток, мм	Фактор			
		запас воды, мм		глубина промерзания, см	продолжительность снеготаяния, сут.
		в почве (0-50 см)	в снеге		
1972	4	167	16	156	3
1973	22	231	44	95	5
1974	24	197	76	100	9
1975	0	220	48	35	15
1977	25	216	130	35	15
1978	81	221	100	100	16
1980	38	189	101	92	4

С глубиной промерзания почвы связь стока сложная. При отсутствии или небольшом промерзании серой лесной почвы сток отсутствует. При глубине замерзания почвы до 35 см и небольших снегозапасах (48 мм) стока с зяби в 1975 г. не было, а при такой же глубине промерзания и снегозапасах 130 мм в 1977 г. величина его составила 25 мм. Связь стока с глубиной промерзания в диапазоне 47-156 см слабая (коэффициенты корреляции колебались от 0,22 до –0,57), т. е. связь даже была отрицательной, хотя по существу, если она есть, то она должна быть только положительной.

Таким образом, более мощное воздействие на формирование стока *У* оказывало увлажнение почвы в слое 0-50 см W_n и снего-

Таблица 3.5

Показатели стока с рыхлой и уплотненной пашни и обусловливающих его факторов на черноземах Курской обл.

Год	Сток, мм	Фактор			
		запас воды, мм		глубина промерзания, см	продолжительность снеготаяния, сут.
		в почве (0-50 см)	в снеге		
Рыхлая пашня, склон южной экспозиции					
1981	22	184	104	47	5
1982	33	246	80	76	12
1983	19	169	87	53	3
1984	0	180	28	106	16
1985	15	158	113	127	11
Рыхлая пашня, склон северной экспозиции					
1981	21	208	98	63	7
1982	20	186	75	78	4
1983	10	170	60	67	6
1984	2	172	57	119	18
1985	14	226	148	111	11
Уплотненная пашня, склон южной экспозиции					
1976*	3	106	128	92	3
1978	17	182	33	105	11
1979	58	212	75	81	14
1979*	73	187	140	86	10
1980	44	172	69	89	9
1981	55	188	87	62	8
Уплотненная пашня, склон северной экспозиции					
1979	77	182	89	77	9
1980	70	192	89	79	5
1981	52	202	88	50	7
1982	39	194	93	52	12

**Данные получены на серых лесных почвах.*

запасы W_c перед снеготаянием. Поэтому мы провели корреляционно-регрессионный анализ связи стока с этими факторами и получили следующие уравнения связи:

на серой лесной почве (рис. 3.4а)

$$У_з = -57 + 0{,}34W_n + 0{,}26W_c,\ (R = 0{,}61;\ M_{yx} = 0{,}26); \qquad (16)$$

на типичном черноземе (рис. 3.4б, в)

$$У_з = -50 + 0{,}25W_n + 0{,}25W_c,\ (R = 0{,}92;\ M_{yx} = 0{,}05), \qquad (17)$$

$$У_п = -116 + 0{,}71W_n + 0{,}41W_c,\ (R = 0{,}74,\ M_{yx} = \pm 0{,}08), \qquad (18)$$

где $У_з$ и $У_п$ соответственно сток с рыхлой и уплотненной пашни.

Графическая аппроксимация уравнений (16)-(18) приведена на рис. 3.4.

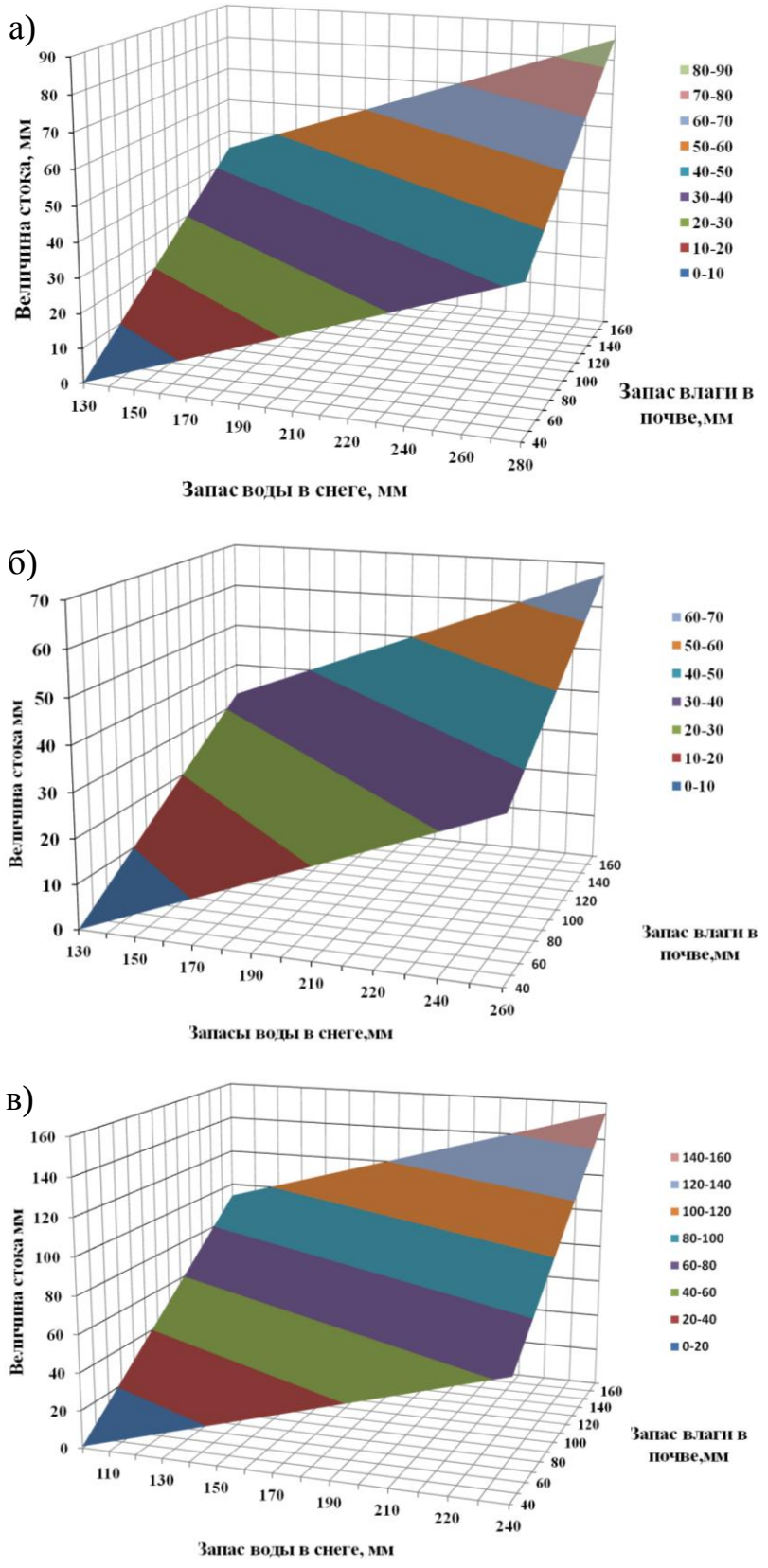


Рис. 3.4. Трехмерная модель связи стока талых вод с запасами воды в почве и снеге (а – на рыхлой пашне серых лесных почв ЦЧО; б – на рыхлой, в – на уплотненной пашне типичного чернозема ЦЧО)

Расчет стока по уравнениям регрессии (16)-(18) дает неплохую сходимость с экспериментальными данными (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Экспериментальные и рассчитанные по уравнениям регрессии (16)-(18) величины стока (мм) с рыхлой и уплотненной пашни на серых лесных почвах и типичных черноземах ЦЧО

Год	Рыхлая пашня		Откло-нение		Год	Уплотненная пашня		Откло-нение	
	экспе-римент.	рас-четные	мм	%		экспе-римент.	рас-четные	мм	%
Серая лесная почва, склон южной экспозиции									
1972	4	4	0	0	1972	Не определяли			
1973	22	34	12	54	1973				
1974	24	30	6	25	1974				
1977	25	36	11	44	1977				
1978	81	44	–37	–46	1978				
1980	38	34	–4	–10	1980				
Типичный чернозем, склон южной экспозиции									
1981	22	22	0	0	1976*	3	12	9	300
1982	33	32	–1	–3	1978	17	27	10	58
1983	19	14	–5	–26	1979	58	65	7	12
1984	0	2	2	-	1979*	73	74	1	1
1985	15	18	3	20	1980	44	34	–10	–22
					1981	55	53	–1	–2
Типичный чернозем, склон северной экспозиции									
1981	21	26	4	19	1979	77	50	–27	–35
1982	20	15	–5	–25	1980	70	57	–13	–18
1983	10	8	2	20	1981	52	63	11	21
1984	2	7	5	250	1982	39	60	21	54

**Данные получены на темно-серых лесных почвах.*

Имеющиеся некоторые большие расхождения видимо связаны с относительно небольшими рядами наблюдений. Итак, важнейшими природными факторами формирования поверхностного стока талых вод являются увлажнение почвы и снегозапасы перед снеготаянием.

В табл. 3.7 приведены материалы наблюдений научно-исследовательской гидрометеорологической обсерватории Каменная степь (вып. 1-23 за 1951-1986 гг.) в условиях обыкновенных черноземов Воронежской обл.

Корреляционно-регрессионный анализ связи стока талых вод с природными факторами (запасы воды в снеге и почве, глубина промерзания почвы, продолжительность снеготаяния) также показал

слабую связь его с продолжительностью снеготаяния (коэффициенты корреляции R = 0,21, M_{yx} = ± 0,22) и глубиной промерзания свыше 40 см (R = –0,01, M_{yx} = 0,005). Если почва талая, то сток не формируется. Связь же стока $У_з$ и $У_п$ с увлажнением верхнего 50-сантиметрового слоя почвы $W_п$ и снегозапасами перед снеготаянием W_c выражается следующими уравнениями:

$$У_з = –40 + 0{,}19W_п + 0{,}38W_c, \quad (R_{WnWc} = 0{,}54,\ M_{yx} = \pm 0{,}21), \quad (19)$$

$$У_п = –12 + 0{,}06W_п + 0{,}69\ W_c, \quad (R_{WnWc} = 0{,}91,\ M_{yx} = \pm 0{,}06). \quad (20)$$

Графическая аппроксимация уравнений (19), (20) приведена на рис. 3.5.

Таблица 3.7

Показатели стока с рыхлой и уплотненной пашни и обусловливающих его факторов на обыкновенных черноземах Воронежской обл.

Год	Сток, мм	Фактор			
		запасы воды, мм		глубина промерзания почвы, см	продолжительность снеготаяния, сут.
		в почве (0-50 см)	в снеге		
Рыхлая пашня					
1952	68	166	81	70	21
1953	58	195	109	60	15
1954	4	188	27	100	16
1956	6	111	130	60	16
1968	35	143	120	50	12
1969	9	188	26	100	17
1981	11	188	78	40	7
1982	2	213	34	42	3
1983	9	175	42	46	5
1984	9	218	41	50	12
1985	24	211	101	40	12
Уплотненная пашня					
1953	92	178	112	80	13
1954	3	101	18	50	16
1956	70	94	133	60	20
1959	46	148	56	55	17
1964	84	169	116	64	15
1965	30	168	36	64	11
1969	15	149	23	72	29
1980	44	181	64	70	7

Расчет стока по уравнениям регрессии (19), (20) дает неплохую сходимость с экспериментальными данными (табл. 3.8).

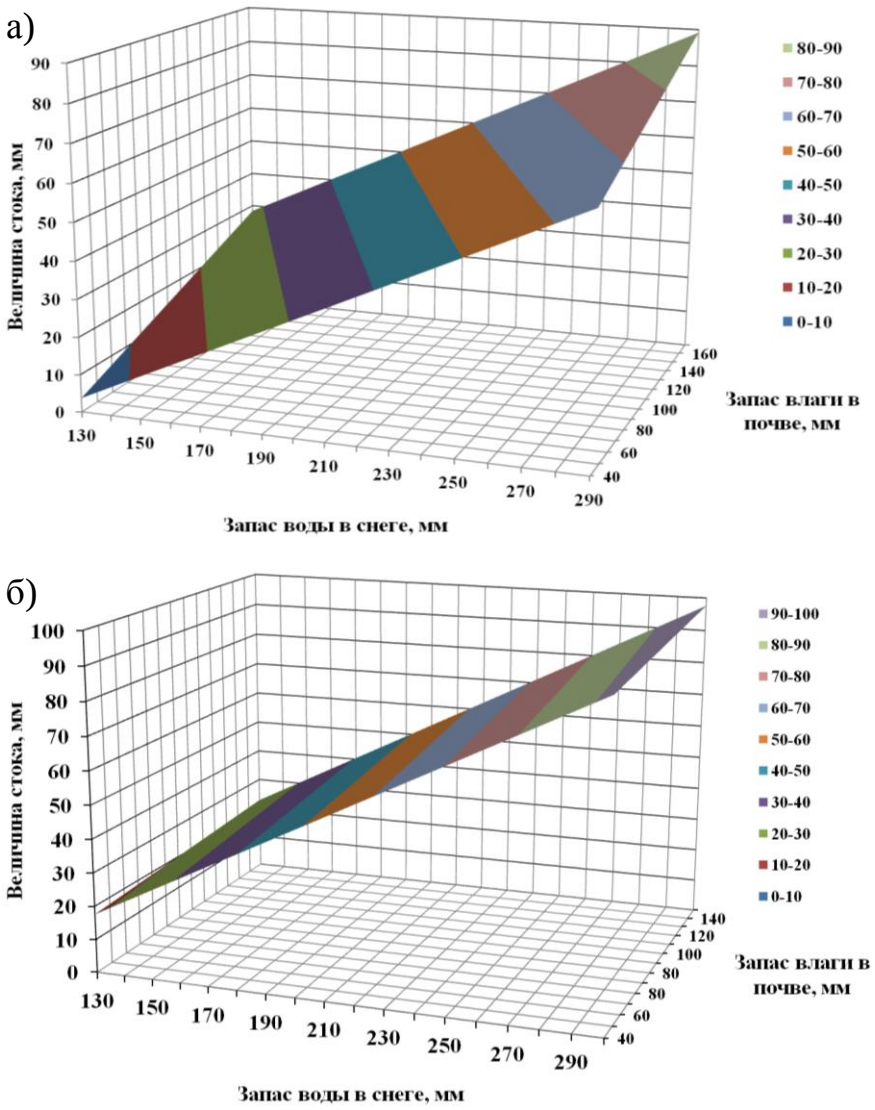


Рис. 3.5. Трехмерная модель связи стока талых вод с запасами воды в почве и снеге (а – на рыхлой, б – на уплотненной пашне обыкновенного чернозема ЦЧО)

Таблица 3.8

Экспериментальные и рассчитанные по уравнениям регрессии (19), (20) величины стока (мм) с рыхлой и уплотненной пашни на обыкновенных черноземах ЦЧО

Год	Эксперимент.	Расчетные	Отклонение		Год	Эксперимент.	Расчетные	Отклонение	
			мм	%				мм	%
рыхлая пашня					уплотненная пашня				
1952	68	22	–46	–68	1953	92	84,0	–8,0	–9
1953	58	39	–19	–32	1954	3	0,4	–2,6	–87
1954	4	6	2	50	1956	70	74,0	4,0	6
1956	6	30	24	400	1959	46	39,0	–7,0	–15
1968	35	33	–2	–6	1964	84	84,0	0	0
1969	9	6	–3	–33	1965	30	31,0	1,0	3
1981	11	25	14	127	1969	15	17,0	2,0	13
1982	2	14	12	600	1980	44	53,0	9,0	20
1983	9	9	0	0					
1984	9	17	8	89					
1985	24	38	14	58					

Влияние природных факторов на формирование стока на обыкновенных черноземах, каштановых и светло-каштановых почвах Поволжья

На обыкновенных черноземах Поволжья при анализе роли природных факторов в формировании стока талых вод использованы материалы исследований И. И. Гункина, Ф. А. Абдульманова, А. В. Лапчука, полученные под руководством автора, данные Г. С. Боброва, В. И. Панова, полученные под руководством Г. П. Сурмача и автора.

Здесь мы рассматриваем влияние на формирование стока талых вод тех же факторов, что и в лесостепи Нечерноземья: снегозапасов, глубины промерзания и влажности почвы.

Снегозапасы. Роли снегозапасов в формировании стока мы уделяем больше внимания потому, что она часто переоценивается и прогнозы получаются ошибочные. На обыкновенных черноземах Самарской обл. также прямой зависимости поверхностного стока талых вод от снегозапасов нет (табл. 3.9). В многоснежные

Таблица 3.9

Снегозапасы и поверхностный сток талых вод на обыкновенных черноземах степи, Самарская обл.

Год	Снегозапасы, мм	Сток, мм	Год	Снегозапасы, мм	Сток, мм
рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6
Многоснежная зима					
1963	104	0	1959	278	32
1964	170	34	1960	137	53
1966	136	27	1961	120	27
1968	109	24	1963	138	12
1972	123	1	1964	140	58
1974	106	12	1965	135	49
1976	114	0	1966	188	50
1978	112	11	1967	110	18
1979	199	32	1968	189	81
1980	165	17	1970	117	86
1981	154	9	1973	111	54
1983	110	8	1974	103	65
1984	114	0	1977	139	43
1985	167	52	1978	145	30
1986	154	13	1979	164	127
1987	228	3	1980	142	56
1988	181	54	1981	123	50
1989	192	0	1983	103	55

Продолжение табл. 3.9

1	2	3	4	5	6
1990	131	14	1985	123	88
1991	113	12	1986	112	75
1992	141	0	1987	214	42
1993	118	0	1988	116	98
1994	115	4	1989	185	17
1995	128	0	1990	137	54
1996	131	0	1991	118	60
1997	195	40	1992	137	23
1998	207	0	1993	110	7
1999	157	0	1994	138	27
2000	154	0	2001	142	30
2001	134	0	2002	117	0
2002	128	0	2003	0	0
2003	134	0	2004	102	0
2004	124	0	2005	154	41
2005	112	12	2007	109	0
2008	121	0	2008	139	0
2010	112	0	2011	126	0
2011	128	0	2012	137	0
2012	148	0	2013	138	0
2013	129	0	2014	182	0
2014	115	0	2015	162	0
2016	105	0	2016	174	0
Среднее	140	9	Среднее	138	37
Малоснежная зима					
1959	65	0	1962	65	11
1960	78	0	1969	74	6
1961	68	0	1971	74	44
1962	51	0	1972	98	26
1965	93	2	1975	81	37
1967	51	0	1976	79	15
1969	58	0	1982	103	55
1970	98	16	1984	97	26
1971	45	5	2006	84	19
1973	52	8	2009	63	0
1975	66	0			
1977	70	1			
1982	57	3			
2006	78	0			
2007	91	0			
2009	50	0			
2015	98	0			
Среднее	69	2	Среднее	82	24

зимы (при снегозапасах больше 100 мм) часто сток отсутствовал либо был очень большим. В малоснежные зимы (при снегозапасах меньше 100 мм) также сток часто формировался вне зависимости от снегозапасов. Так, на рыхлой пашне в многоснежные зимы сток в отдельные годы (1985, 1988) сформировался относительно большой – 52 и 54 мм при снегозапасах 167 и 181 мм соответственно, а в другие годы (1989, 1998) при снегозапасах 192 и 207 мм стока совсем не было. И таких лет с отсутствием стока при больших снегозапасах (104-207 мм) было 23 из 41. В малоснежные зимы сток не сформировался 11 лет из 17, три года он был незначительный. При запасах воды в снеге 98 мм сток в 2015 г. не сформировался, а в 1970 г. величина его составила 16 мм. На уплотненной пашне сток также по годам колебался независимо от снегозапасов. В многоснежную зиму 1979 г. при запасах воды в снеге 164 мм сток был 127 мм, в 2016 г. при снегозапасах 174 мм он отсутствовал. Такие годы с отсутствием стока повторялись 11 лет из 41. В малоснежные зимы при запасах воды в снеге 63 мм стока не было, а при снегозапасах 74 мм величина его составила 44 мм.

Парный корреляционный анализ связи стока со снегозапасами показал отсутствие прямой зависимости его от запасов воды в снеге. Коэффициент корреляции на рыхлой пашне составил 0,43, а стандартная ошибка 11,2. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 0,16 и 30,2. Средняя величина стока в много- и малоснежные годы сильно различается. На рыхлой пашне в многоснежные годы она была 9 мм, а в малоснежные – 2 мм. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 37 и 24 мм, т. е. снегозапасы влияют на сток, но во взаимодействии с другими факторами: влажностью почвы и глубиной ее промерзания.

Глубина промерзания и увлажнение почвы в этой зоне также являются важнейшим природными факторами формирования стока. Показатели стока талых вод и факторов, обусловливающих его формирование на обыкновенных черноземах Самарской обл. приведены в табл. 3.10. Анализ этих данных показывает, что на зяби в большинстве случаев стока нет или он незначительный. Решающую роль в его отсутствии играют глубина промерзания и увлажнение почвы перед снеготаянием. Сток отсутствовал в годы, когда глубина промерзания почвы была меньше 50 см – 1969, 1972, 1975, 2000, 2001-2003, 2007-2009, 2011-2016. Сток также отсутствовал и

в годы с низкими запасами влаги в почве – 1961, 1962, 1969, 1972, 1975 и др. В некоторые годы сток отсутствовал под влиянием двух факторов одновременно: глубины промерзания и запасов влаги в верхнем (0-50 см) слое почвы. Это были годы 2000-2003, 2007 и др. В годы, когда формировался сток (1968, 1970, 1971, 1973) глубина промерзания была большая – 80-150 см.

Таблица 3.10

Показатели стока с рыхлой пашни и факторов, обусловливающих его формирование на обыкновенных черноземах, Самарская обл.

Год	Сток, мм	Фактор		
		запасы воды, мм		глубина промерзания почвы, см
		в почве (0-50 см)	в снеге	
Годы без стока				
1960	0	177	57	-
1961	0	124	62	60
1962	0	147	30	70
1969	0	101	49	150
1972	0	96	124	150
1975	0	107	73	87
2000	0	99	154	31
2001	0	108	134	25
2002	0	116	128	15
2003	0	107	134	37
2004	0	-	124	28
2006	0	104	78	75
2007	0	77	91	34
2008	0	105	121	24
2009	0	108	50	48
2010	0	130	112	63
2011	0	152	128	0
2012	0	187	148	29
2013	0	195	129	42
2014	0	170	115	43
2015	0	166	98	27
2016	0	193	105	38
Годы со стоком				
1968	22	111	70	150
1970	8	120	73	150
1971	5	116	48	150
1973	6	113	54	80

Таким образом, в степной зоне на обыкновенных черноземах Самарского Заволжья природными факторами, которые необходимо учитывать при прогнозе величины (объема) поверхностного стока талых вод, являются только глубина промерзания, увлажнение почвы и снегозапасы. Все остальные факторы можно не учитывать.

К сожалению, по Самарскому Заволжью количество лет со стоком было малым, всего 4. Регрессионный анализ связи стока талых вод $У_р$ с увлажнением верхнего полуметрового слоя почвы W_n и снегозапасами W_c перед снеготаянием показал, что коэффициент множественной корреляции очень низкий – 0,48. Эта связь выражается следующим уравнением:

$$У_р = –53 + 0{,}51W_n + 0{,}04W_c. \qquad (21)$$

На каштановых почвах Поволжья исследования проводились на Нижневолжской станции по селекции древесных пород и Клетской НИАГЛОС – филиалах ФНЦ агроэкологии РАН. При анализе роли природных факторов в формировании стока талых вод использованы материалы исследований автора, В. И. Антонова, А. И. Узолина, полученные под руководством автора, данные В. П. Борца, Н. М. Пынзарю, полученные под руководством и с участием Г. П. Сурмача.

Показатели стока и обусловливающих его факторов на рыхлой и уплотненной пашне на каштановых почвах Волгоградской обл. приведены в табл. 3.11. На рыхлой пашне 12 лет из 24 стока не было. Десять лет из них он не сформировался, потому что почва была либо талая, либо промерзала на небольшую глубину – до 42 см. Два года (1972 и 1973) почва промерзала глубоко (до 150 см), но в связи с тем, что она была сухая, сток талых вод тоже не сформировался. Остальные 12 лет формировался сток разной величины. При этом 10 лет лимитирующим фактором его формирования была глубина промерзания почвы. Она колебалась от 65 до 150 см.

Регрессионный анализ данных за годы с глубоким промерзанием почвы (56-150 см) позволил получить следующее уравнение связи стока с природными факторами:

$$У_р = –41 + 0{,}44W_n + 0{,}39W_c + 0{,}02H, \qquad (22)$$

где H – глубина промерзания почвы, см.

Парные коэффициенты корреляции соответственно равны 0,87; 0,81 и –0,08; множественный –0,98.

Парные коэффициенты корреляции показывают, что связи стока с глубиной промерзания в диапазоне 65-150 см нет, с увлажнением почвы и снегозапасами она высокая.

Таблица 3.11

Показатели стока талых вод и факторов, обусловливающих его формирование на каштановых почвах степи, Волгоградская обл.

Год	Сток, мм	Запас воды, мм		Глубина промерзания почвы, см	Продолжительность снеготаяния, сут.	Сток, мм	Запас воды, мм		Глубина промерзания почвы, см	Продолжительность снеготаяния, сут.
		в почве	в снеге				в почве	в снеге		
рыхлая пашня						уплотненная пашня				
Годы без стока										
1967	0	61	108	0	-	0	49	99	0	-
1968	0	47	124	5	15	0	46	111	5	15
1972	0	77	14	150	-	0	85	21	150	-
1973	0	50	44	83	-	-	-	-	-	-
1984	0	66	17	-	-	-	-	-	-	-
1987	0	70	141	33	15	-	-	-	-	-
2001	0	89	17	26	6	-	-	-	-	-
2002	-	-	-	-	-	0	51	29	20	9
2005	0	75	28	42	15		-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	0	181	43	33	12
2007	0	95	91	30	14					
2008	-	-	-	-	-	0	91	22	24	9
2010	-	-	-	-	-	0	230	14	50	14
2011	0	219	10	37	8	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-	0	250	55	15	13
2013	0	216	14	22	10	-	-	-	-	-
2014	-	-	-	-	-	0	219	25	38	17
2015	0	230	21	25	4	-	-	-	-	
2016	-	-	-	-	-	0	224	10	24	6
Годы со стоком										
1969	17	74	52	150	-	31	67	48	150	-
1971	31	101	73	110	-	45	128	61	83	-
1982	5	87	55	-	-	-	-		-	-
1983	15	83	40	-	-	-	-	-		-
1985	20	71	66	-	-		-	-		-
1986	36	-	71	-	26	-			-	-
1988	21	88	47	56	31	-		-	-	-
1989	4	-	47	65	12	-	-		-	-
1990	19	92	40	57	3	-	-	-	-	-
2003	25	119	80	65	13	-	-	-	-	-

Проведя регрессионный анализ с двумя факторами, получили следующее уравнение (коэффициенты корреляции: парные

0,87 и 0,81; множественный 0,96):

$$У_p = –27 + 0,38W_n + 0,29W_c. \quad (23)$$

Аппроксимация этой связи приведена на рис. 3.6.

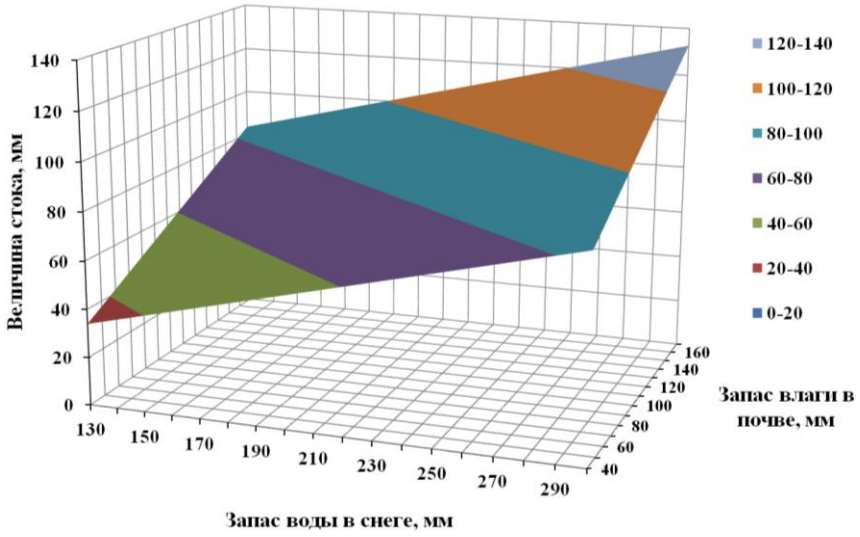


Рис. 3.6. Трехмерная модель связи стока талых вод с запасами воды в почве и снеге на рыхлой пашне каштановых почв Волгоградской обл.

На уплотненной пашне сток отсутствовал 9 лет по причине слабого промерзания почвы (до 55 см), а один год (1972) при глубине ее промерзания 150 см он не сформировался из-за низких запасов влаги в ней. Расчет стока по уравнениям (22), (23) позволяет с высокой точностью определять его величину (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Экспериментальные и рассчитанные по уравнениям регрессии (22), (23) величины стока с рыхлой пашни на каштановых почвах, мм, Волгоградская обл.

Год	Экспериментальные	Расчетные	Отклонение	
			мм	%
1969	17	16	–1	6
1971	31	32	1	3
1983	15	16	1	7
1985	20	19	–1	5
1988	21	20	–1	5
1990	19	20	1	5

На светло-каштановых почвах Поволжья при анализе роли природных факторов в формировании стока талых вод использованы материалы исследований автора, М. М. Кочкаря, Р. Д. Балычева, А. В. Кулик, Р. Е. Смирнова, полученные под руководством автора, В. Е. Величкина, Е. И. Куницкого, В. П. Борца, полученные под руководством и с участием Г. П. Сурмача, а так-

же данные Ю. В. Бондаренко.

Показатели стока и снегозапасов перед снеготаянием приведены в табл. 3.13. Они показывают, что и в этих условиях величина стока напрямую не связана с запасами воды в снеге. Часто при больших снегозапасах стока нет, а при малых он формируется, и наоборот. Так, при снегозапасах 143 мм в 1967 г. сток на рыхлой пашне отсутствовал, а в 1979 г. при снегозапасах 147 мм величина его была 45 мм, в 1959 г. при снегозапасах 93 мм стока не было, в 1994 г. при снегозапасах 55 мм величина его составила 13 мм, а в 1951 г. при запасах воды в снеге 31 мм сток составил 22 мм. Подобные данные получены и по другим годам. В многоснежные зимы количество лет с отсутствием стока на рыхлой пашне было 12 из 22 при большом варьировании снегозапасов – от 55 до 143 мм. В малоснежные зимы сток не сформировался 7 лет из 12, также и при большой вариации снегозапасов от 11 до 47 мм.

Таблица 3.13

Снегозапасы и поверхностный сток талых вод на светло-каштановых почвах степи, Волгоградская обл.

Год	Снегозапасы, мм	Сток, мм	Год	Снегозапасы, мм	Сток, мм
рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6
Многоснежная зима					
1952	101	4	1959	92	51
1954	55	0	1962	77	34
1956	55	26	1963	137	76
1959	93	0	1964	74	27
1962	74	1	1967	189	0
1963	92	36	1968	150	30
1964	61	2	1970	136	36
1967	143	0	1971	85	33
1970	129	7	1973	96	2
1971	75	1	1977	154	43
1973	89	0	1978	73	35
1979	147	45	1979	164	58
1987	99	0	1980	63	10
1994	55	13	1987	98	0
1995	52	0	1994	64	58
1996	79	0	1995	58	0
1997	60	0	1996	70	0
2003	50	3	1997	60	0
2006	78	0	2010	58	2

Продолжение табл. 3.13

1	2	3	4	5	6
2010	89	0	2011	70	23
2012	70	0	2012	108	0
2014	88	0	2013	69	0
			2014	101	0
Среднее	83	6	Среднее	98	23
Малоснежная зима					
1950	35	0	1950	45	12
1951	31	22	1958	40	25
1953	28	0	1960	16	10
1955	22	0	1961	18	13
1957	26	4	1965	41	25
1958	47	8	1966	15	7
1960	15	0	1969	17	3
1961	21	0	1972	23	0
1965	31	4	1974	49	5
1966	15	0	1975	27	7
1968	44	16	1976	36	7
1969	11	0	1981	0	0
1972	22	0	1983	0	0
1974	41	0	1984	0	0
1975	20	1	1986	32	7
1976	26	0	1988	27	21
1977	54	5	1989	45	39
1978	17	13	1990	47	5
1980	41	0	1991	17	0
1981	0	0	1992	42	1
1982	17	0	1993	14	1
1983	0	0	1998	37	0
1984	0	0	1999	27	10
1985	39	0	2000	24	0
1986	30	6	2003	35	11
1988	44	5	2004	32	12
1989	25	3	2005	19	0
1990	38	0	2009	31	0
1991	22	0	-	-	-
1992	39	0	-	-	-
1993	17	0	-	-	-
1998	10	0	-	-	-
2000	21	0	-	-	-
2001	14	0	-	-	-
2002	0	0	-	-	-
2004	26	1	-	-	-

Окончание табл. 3.13

1	2	3	4	5	6
2005	18	0	-	-	-
2007	5	0	-	-	-
2008	31	0	-	-	-
2009	44	0	-	-	-
2011	15	0	-	-	-
2013	41	0	-	-	-
2015	43	0	-	-	-
Среднее	25	2	Среднее	27	8

На уплотненной пашне сток формируется чаще и больше, чем на рыхлой. В многоснежные зимы сток не сформировался 7 лет из 19 при снегозапасах 58-189 мм, 2 года он был незначительный (2 мм при снегозапасах 58 и 96 мм), а в остальные годы величина его колебалась от 10 до 76 мм вне зависимости от запасов воды в снеге.

Парный корреляционный анализ связи стока со снегозапасами показал отсутствие прямой зависимости его от запасов воды в снеге. Коэффициент корреляции на рыхлой пашне составил 0,36, а стандартная ошибка 7,9. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 0,50 и 16,3. Средние показатели стока в много- и малоснежные годы сильно различаются. На рыхлой пашне в многоснежные годы сток был 9 мм, а в малоснежные 2 мм. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 37 и 24 мм, т. е. снегозапасы влияют на сток, но во взаимодействии с другими факторами – влажностью почвы и глубиной ее промерзания.

Глубина промерзания и увлажнение почвы в зоне светло-каштановых почв Волгоградской обл. также являются важнейшими природными факторами формирования стока. Показатели стока талых вод и факторов, обусловливающих его формирование, приведены в табл. 3.14. Анализ этих данных показывает, что на рыхлой пашне в большинстве случаев стока нет или он незначительный. Решающую роль в его отсутствии играет глубина промерзания и увлажнение почвы перед снеготаянием. Сток в 38 из 48 лет отсутствовал. Главная причина его отсутствия – это небольшая глубина промерзания почвы. Он отсутствовал 30 лет из 38 в годы, когда глубина промерзания почвы была меньше 50 см, 8 лет – в годы с низкими запасами воды в почве (1964, 1969, 1971, 1972, 1993, 1998, 2004, 2006) при глубоком ее промерзании (55-189 см). В некоторые годы сток отсутствовал под влиянием двух факторов одно-

временно: глубины промерзания и запасов влаги в верхнем (0-50 см) слое почвы. Это были годы 1973, 1974, 1984, 1987 и др. В годы, когда формировался сток (1965, 1968, 1994, 2003, 2011), глубина промерзания была всегда большая – 52-112 см. На уплотненной пашне сток отсутствовал 17 лет из 26. Причем 15 лет из 17 он отсутствовал в годы, когда почва была талая или промерзала на небольшую глубину – до 30 см и только 2 года (1972 и 1993) сток отсутствовал при большой глубине промерзания – 80 и 160 см. В эти годы лимитирующим фактором формирования стока был низкий уровень увлажнения верхнего (0-50 см) слоя почвы. Он составлял соответственно 83 и 73 мм. В эти годы были также и небольшие снегозапасы – 23 и 14 мм. В годы, когда формировался сток, глубина промерзания почвы была большой, она колебалась от 55 до 150 см.

Таблица 3.14

Показатели стока талых вод и факторов, обусловливающих его формирование на светло-каштановых почвах степи, Волгоградская обл.

Год	Сток, мм	Запасы воды, мм		Глубина промерзания почвы, см	Продолжительность снеготаяния, сут.	Сток, мм	Запасы воды, мм		Глубина промерзания почвы, см	Продолжительность снеготаяния, сут.
		в почве	в снеге				в почве	в снеге		
рыхлая пашня						уплотненная пашня				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Годы без стока										
1966	0	57	7	0	12	-	-	-	-	-
1967	0	119	155	0	20	0	98	189	15	20
1969	0	99	15	189	2	-	-	-	-	-
1971	0	71	76	100	8	-	-	-	-	-
1972	0	94	28	160	3	0	83	23	160	3
1973	0	66	45	0	12	0	74	90	0	12
1974	0	70	48	0	6	-	-	-	-	-
1981	0	-	0	20	0	-	-	-	-	-
1982	0	90	17	0	2	-	-	-	-	-
1983	0	87	0	30	0	-	-	-	-	-
1984	0	64	0	40	0	-	-	-	-	-
1985	0	205	39	20	12	0	-	39	17	12
1986	0	223	31	30	15	0	-	32	30	15
1987	0	73	99	10	2	0	87	96	20	20
1988	0	115	44	40	8	-	-	-	-	-
1989	0	213	25	40	5	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1990	0	64	31	35	8	-	-	-	-	-
1991	0	105	22	42	4	-	-	-	-	-
1992	0	73	39	10	2	0	104	41	20	2
1993	0	120	17	80	5	0	73	14	80	5
1995	0	120	70	10	5	0	91	75	10	5
1996	0	131	54	20	4	0	86	59	20	4
1997	0	111	90	0	7	-	-	-	-	-
1998	0	140	10	55	3	-	-	-	-	-
2000	0	78	21	0	2	0	75	24	0	2
2001	0	86	14	0	2	-	-	-	-	-
2002	0	59	0	0	7	-		-	-	-
2005	0	81	18	12	6	0	85	19	12	6
2006	0	78	78	100	8	-	-	-	-	-
2007	0	98	5	35	2	-	-	-	-	-
2008	0	127	31	15	4	-	-	-	-	-
2009	0	124	44	10	9	0	104	31	15	9
2010	0	150	89	20	12	0	245	72	20	12
2012	0	91	70	12	6	0	105	108	5	6
2013	0	114	41	20	3	0	112	69	10	3
2014	0	168	88	25	3	0	127	101	20	3
Годы со стоком										
1964	1	52	32	70	10	-	-	-	-	-
1965	4	46	31	52	5	-	-	-	-	-
1968	16	122	60	100	8	35	124	151	100	8
1969	-	-	-	-	-	3	72	19	150	2
1971	-	-	-	-	-	33	120	85	115	8
1991	-	-	-	-	-	4	89	17	61	4
1994	13	159	55	60	6	58	159	64	70	6
1999						10	115	25	55	7
2003	3	145	50	90	16	11	148	35	95	16
2004	1	160	26	60	4	12	131	32	60	4
2011	15	112	42	112	4	23	77	70	75	4

Связи величины стока с продолжительностью периода снеготаяния как на рыхлой, так и на уплотненной пашне нет. Коэффициент корреляции составляет всего 0,53 и 0,10.

Таким образом, на светло-каштановых почвах Волгоградской обл. природными факторами, которые необходимо учитывать при прогнозе величины (объема) поверхностного стока талых вод, являются только глубина промерзания, увлажнение почвы и снегозапасы. Все остальные факторы можно не учитывать.

При промерзании почвы свыше 50 см формируется сток разной величины и он не зависит от дальнейшего увеличения ее глубины. Он полностью зависит от запасов воды в почве и снеге.

Регрессионный анализ данных в годы со стоком на рыхлой пашне показал, что эта связь выражается следующим уравнением (коэффициенты корреляции: парные 0,32 и 0,42; множественный 0,57):

$$У_р = –5,2 + 0,04W_п + 0,44W_с. \quad (34)$$

Коэффициент корреляции стока с глубиной промерзания равен –0,49. Анализ данных на уплотненной пашне за годы с глубиной промерзания 55-115 см показал, что связь стока с запасами воды в почве и снеге выражается следующим уравнением (коэффициенты корреляции: парные 0,61 и 0,48, множественный 0,78):

$$У_п = –22,1 + 0,26W_п + 0,23W_с. \quad (35)$$

Коэффициент корреляции стока с глубиной промерзания почвы –0,55. Аппроксимация связи стока талых вод с запасами воды в почве и снеге приведена на рис. 3.7.

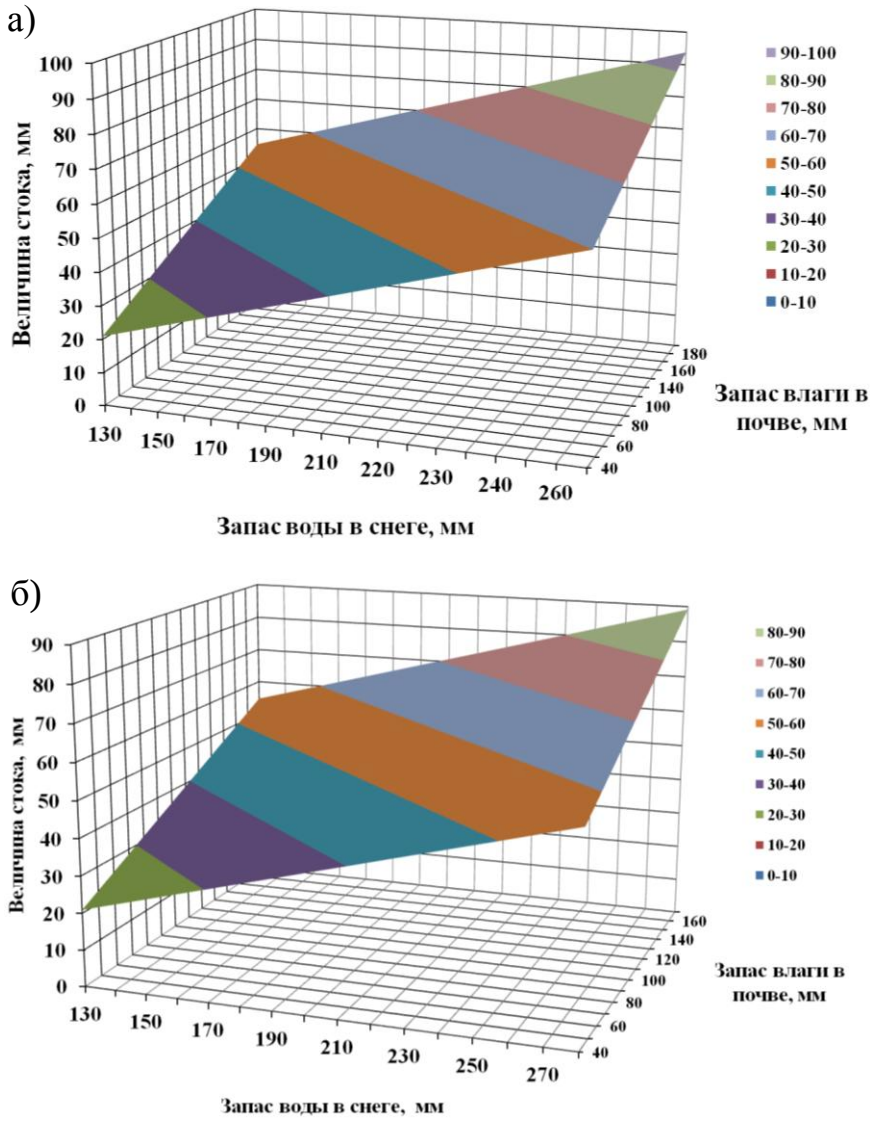


Рис. 3.7. Трехмерная модель связи стока талых вод с запасами воды в почве и снеге на рыхлой (а) и уплотненной пашне (б) светло-каштановых почв Волгоградской обл.

Сравнительные показатели экспериментальных и рассчитанных по уравнениям регрессии (34), (35) величин стока с рыхлой и уплотненной пашни на светло-каштановых почвах Волгоградской обл. приведены в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Экспериментальные и рассчитанные по уравнениям регрессии (34), (35) величины стока с рыхлой и уплотненной пашни на светло-каштановых почвах Волгоградской обл., мм

Год	Экспери-ментальные	Расчет-ные	Отклонение		Год	Экспери-ментальные	Расчет-ные	Отклонение	
			мм	%				мм	%
рыхлая пашня					уплотненная пашня				
1964	1	7	6	600	1968	35	43	0	0
1965	4	7	3		1969	3	1	–2	66
1968	16	16	0	0	1971	33	28	–5	15
1994	13	25	12	92	1991	4	5	1	25
1999	-	-	-	-	1994	58	33	–25	43
2003	3	23	20	667	1999	10	13	3	30
2004	1	12	11	1100	2003	11	24	13	118
2011	15	18	3	20	2004	12	19	7	58
					2011	23	13	–10	43

3.3. Закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод, его прогноз и методика расчета

3.3.1. Закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод

В результате теоретических и экспериментальных исследований, а также на основе обобщения имеющихся материалов автором впервые был сформулирован и обоснован *закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод* [33, 34] и разработана методика высокоточного (80-90 и иногда 100 %), заблаговременного (1,5-2 месяца) прогноза стока [112]. Установлено, что главными природными факторами, обусловливающими формирование стока, являются только глубина промерзания, влажность почвы и снегозапасы. Другие факторы на общую величину стока талых вод за период весеннего снеготаяния практически не влияют. Они могут повлиять на интенсивность стока.

Суть закона заключается в том, что *при некотором минимальном значении одного из трех лимитирующих факторов (сне-*

гозапасы, глубина промерзания и влажность почвы) поверхностный сток не формируется независимо от уровня двух других.

Определены максимальные значения факторов, при которых сток не формируется. На юге ЦРНЗ, в ЦЧО и Поволжье, если почва талая или промерзла до глубины не более 50 см, стока не бывает независимо от уровня ее увлажнения и снегозапасов. Дальнейшее увеличение глубины промерзания почвы выше лимитирующего уровня не влияет на величину стока, т. е. при любой глубине промерзания почвы выше лимитирующей он формируется одинаковый при одинаковых уровнях других факторов. Решающее влияние на него в этом случае оказывают влагозапасы в почве и снеге. При увлажнении верхнего (0-50 см) слоя почвы до уровня менее 120-130 мм на юге ЦРНЗ и 70-95 мм в Нижнем Поволжье сток не формируется независимо от глубины промерзания почвы и снегозапасов, т. е. в данном случае лимитирующим фактором является увлажнение почвы. При запасах воды в снеге меньше объема микрорельефа пашни сток также не формируется.

При уровнях факторов выше лимитирующих, т. е. глубине промерзания почвы свыше 50 см, запасах воды в ней больше 70-120 мм и снегозапасах, превышающих емкость микрорельефа, сток формируется на всех угодьях и величина (объем) его зависит только от запасов воды в снеге и почве.

На основе математического анализа результатов исследований разработаны модели формирования поверхностного стока талых вод на разных типах почв (серые лесные, черноземы, каштановые и светло-каштановые), видах угодий (пашня, луг, залежь) и пашни (зябь, озимые, многолетние травы и др.). Уравнения связи стока с природными факторами приведены в табл. 3.16. В зональном плане эта связь проявляется по-разному. На юге ЦРНЗ и севере ЦЧО наиболее мощным фактором формирования стока как на рыхлой, так и на уплотненной пашне является увлажнение почвы; на юге ЦЧО на рыхлой и уплотненной пашне на величину стока сильнее влияют снегозапасы; в Поволжье на рыхлой пашне наиболее мощным фактором является увлажнение почвы, а на уплотненной пашне – снегозапасы.

Расчет стока по уравнениям (36)-(48) дает довольно близкую сходимость расчетных данных с экспериментальными.

Таким образом, обобщение и анализ материалов по влиянию на сток талых вод природных факторов в лесостепной, степной и

полупустынной зонах показали, что важнейшими факторами формирования поверхностного стока талых вод являются снегозапасы, увлажнение и глубина промерзания почвы перед снеготаянием. Многие другие факторы при прогнозировании стока можно не учитывать. Они играют несущественную роль.

Таблица 3.16

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	$У_р = -141 + 0{,}08W_п + 0{,}38W_с$ (36) $R_{У_рW_пW_с} = 0{,}93$; $M_{ух} = 12{,}4$	$У_п = -16{,}4 - 0{,}15W_п + 0{,}34W_с$ (37) $R_{У_пW_пW_с} = 0{,}81$; $M_{ух} = 13{,}3$
Лесостепь, Курская, серая лесная,	$У_р = -57 + 0{,}34W_п + 0{,}26W_с$ (38) $R_{У_рW_пW_с} = 0{,}61$; $M_{ух} = 26{,}8$	Нет данных
типичный чернозем	$У_р = -50 + 0{,}25W_п + 0{,}25W_с$ (39) $R_{У_рW_пW_с} = 0{,}92$; $M_{ух} = 4{,}5$	$У_п = -116 + 0{,}71W_п + 0{,}41W_с$ (40) $R_{У_пW_пW_с} = 0{,}74$; $M_{ух} = 16{,}0$
Степь, Воронежская, обыкновенный чернозем	$У_р = -40 + 0{,}19W_п + 0{,}38W_с$ (41) $R_{У_рW_пW_с} = 0{,}54$; $M_{ух} = 21{,}5$	$У_п = -12 + 0{,}06W_п + 0{,}69W_с$ (42) $R_{У_пW_пW_с} = 0{,}91$; $M_{ух} = 6{,}8$
Степь, Самарская, обыкновенный чернозем	$У_р = -53 + 0{,}51W_п + 0{,}04W_с$ (43) $R_{У_рW_пW_с} = 0{,}48$; $M_{ух} = 8{,}4$	$У_п = -24 + 0{,}17W_п + 0{,}40W_с$ (44) $R_{У_пW_пW_с} = 0{,}92$; $M_{ух} = 7{,}0$
Полупустыня, Волгоградская, каштановая	$У_р = -27 + 0{,}38W_п + 0{,}29W_с$ (45) $R_{У_рW_пW_с} = 0{,}96$; $M_{ух} = 7{,}1$	$У_п = -4 + 0{,}19W_п + 1{,}14W_с$ (47) $R_{У_пW_пW_с} = 0{,}92$; $M_{ух} = 9{,}2$
светло-каштановая	$У_р = -5{,}2 - 0{,}04W_п + 0{,}44W_с$ (46) $R_{У_рW_пW_с} = 0{,}64$; $M_{ух} = 6{,}3$	$У_п = -21{,}9 + 0{,}26W_п + 0{,}22W_с$ (48) $R_{У_пW_пW_с} = 0{,}84$; $M_{ух} = 13{,}1$

3.3.2. Методика прогноза и расчета стока

В настоящее время в стране нет надежной методики прогноза поверхностного стока талых вод с водосборных бассейнов. Ошибка прогноза стока в бассейнах Волги и Дона очень высокая. В среднем она составляет 35 %, а бывает и 100 %. Часто прогнозируется очень большой сток, а он не формируется совсем или бывает очень сла-

бый. 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 двум-трем ведущим факторам можно делать долгосрочный (2-3 месяца) высокоточный (80-100 %) прогноз. Зарубежный опыт нам не подходит, так как в большинстве стран формируется преимущественно ливневый сток, а в странах, где есть сток талых вод (США, Канада и др.) условия сильно отличаются от наших. Опыт прогноза стока для бассейнов Волги и Дона нельзя переносить, например, на сибирские реки или реки европейской части РФ, впадающие в северные моря. Отсутствие надежного прогноза связано с тем, что не было хорошей теоретической основы для него. Не были выявлены закономерности формирования поверхностного стока. По итогам теоретических и экспериментальных исследований, выполненных во ВНИАЛМИ, 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.

Для малых водосборов прогноз стока талых вод дается на основе учета ведущих природных факторов, влияющих на его формирование и соотношения площадей, находящихся под рыхлой (отвальная зябь) и уплотненной пашней (озимые, многолетние травы, залежь и др.). Для расчета стока на бассейнах рек также учитываются эти природные факторы, а соотношение площадей под рыхлой и уплотненной пашней определяется по регионам в пределах водосборов рек.

Положения настоящей методики основаны на оригинальном подходе и по ним можно давать высокоточный (80-100 %) прогноз величины поверхностного стока талых вод. Если почва та-

лая, 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 %.

Для расчета величины поверхностного стока талых вод необходимы следующие характеристики: запасы воды в снеге, мм; глубина промерзания почвы, см; запасы воды в слое 0-50 см, мм; общая площадь водосбора, га (км^2); площадь водосбора под рыхлой пашней (зябь), га (км^2); площадь водосбора под уплотненной пашней (озимые, многолетние травы, залежь), га (км^2); площадь лесных угодий, га (км^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 и других насаждений. На водосборах проводят разовые снегомерные съемки за 15-20 дней до снеготаяния по заранее намеченным постоянным маршрутам, которые наносят на план водосбора, нумеруют и закрепляют 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 границах 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 пяти-шести, 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 угодии измеряется весовым снегомером ВС-43 в пяти 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 средней высоты снега (мм) и его средней плотности (г/см^3). На всем комплексном водосборе запас воды в снеге X определяется как средневзвешенная величина через площадь отдельных угодий S_i и всю площадь S:

$$X = \frac{\sum X \cdot Si}{S}. \qquad (49)$$

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

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 при помощи мерзлотомера Данилина МД-2, проводя наблюдения 3 раза в месяц. Одновременно проводят 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 данный 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.

Влажность мерзлой почвы определяется в 3-кратной повторности 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

$$W = \frac{M \cdot V \cdot K}{10}, \qquad (50)$$

где M – мощность слоя почвы, см; V – объемная масса почвы, г/см^3; K – 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.

Алгоритм прогноза поверхностного стока талых вод в зависимости от уровня природных факторов приведен в табл. 3.17. 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 промерзания почвы свыше лимитирующего на величину стока не влияет. 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.

Таблица 3.17

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	
Менее 50	Любой	Любой	Сток не формируется
Более 50	Менее 70-120 (по зонам)	Любой	Сток не формируется
	Более 70-120 (по зонам)	Меньше объема микрорельефа	Сток не формируется
		Больше объема микрорельефа	Сток формируется, величина его зависит от уровня запасов воды в снеге и почве

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

$$У = (\sum_{1}^{n} У_i \cdot S_i / \sum_{1}^{n} S_i) - У_{пэм}, \qquad (51)$$

где $У_i$ – сток с i-того агрофона, мм, рассчитывается по уравнениям (36)-(48); 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 полная система мероприятий).

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 (36), (37), 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.

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.

3.4. Влияние антропогенных факторов на формирование поверхностного стока талых вод

3.4.1. Характеристика поверхностного стока талых вод на землях, не подверженных антропогенному воздействию

В. В. Докучаев в своей работе "Наши степи прежде и теперь" отмечал: "... если желают поставить русское сельское хо-

зяйство на твердые ноги, ... чтобы оно было приноровлено к местным физико-географическим (равно как историческим и экономическим) условиям страны, ... необходимо, чтобы эти условия, – все естественные факторы (почва, климат с водой и организмы) были исследованы, ... всесторонне и непременно во взаимной их связи" [1]. Это замечательное выражение В. В. Докучаева по сути является квинтэссенцией того, что в настоящее время называется системным подходом в исследовании конкретного объекта и идеологией выработки адаптированных к местным условиям систем ведения сельского хозяйства и в целом природопользования. Теперь это называется адаптивно-ландшафтная система земледелия, ведущую роль в которой играет агролесомелиоративное адаптивно-ландшафтное обустройство территории.

Блестящий анализ причин постигшего Россию в 1891 г. недорода привел В. В. Докучаева к следующим главнейшим выводам: ведущей причиной неурожая 1891 г. (и других лет) была не только и не столько жестокая засуха ("здесь не собрано и семян, а в соседнем поле получено 80-100 пудов (13-16 ц) с десятины"), но общее расстройство сельского и водного хозяйства России, обусловленное нерациональным истощительным использованием почв, в т. ч. вследствие социально-экономических факторов; для "реставрации степей" необходим комплекс мероприятий (агротехнических, гидротехнических, облесительных) с выработкой норм соотношения площади пашни, лугов, леса и вод, а также организация специальных научно-исследовательских учреждений. Все эти положения нашли свое воплощение в работе Особой экспедиции Лесного департамента (1892-1897 гг.) "по испытанию и учету различных способов и приемов лесного и водного хозяйства в степях России" [1].

В. В. Докучаевым была внесена ясность в причины "недородов" вследствие не только климатических засух и в саму постановку вопроса о связи неурожаев и проявлений засухи (в первую очередь, почвенной) с деградацией почв, утерей ими вследствие распашки благоприятных водно-физических свойств и изменении водного баланса естественных ландшафтов степи. Подчеркивая особое значение лесной подстилки и степного войлока для формирования "крупитчатой" структуры черноземов, их способности в девственном состоянии хорошо поглощать влагу, В. В. Докучаев упоминает о наблюдениях Игнатьева, отметившего, что при снеготаянии "на целинной степи не видно больших потоков, тогда как на

старопашных полях они бегут по всем направлениям" [1]. Позднее А. С. Козменко также отмечал, что распашка территории и уничтожение лесов "повели за собой увеличение интенсивности стока" и "энергии размыва" [2].

Количественные оценки гидрологического режима девственных территорий и его изменений под влиянием скотоводства и земледелия до сих пор крайне малочисленны. Полученные в ОПХ НИИСХ ЦЧП им. В. В. Докучаева в Каменной степи на элементарных стоковых площадках данные позволяют оценить эволюцию водного баланса территории при ее хозяйственном освоении (табл. 3.18).

Таблица 3.18

Водный баланс талых вод на склонах в Каменной степи в среднем за 1950-1958 гг. [84]

Экосистема, угодье, агрофон	Водный баланс, мм			
	снегозапасы, мм	водопоглощение, мм	сток, мм	коэффициент стока
Заповедная территория				
Степь некосимая (целина)	128	128	0	0
Территория, измененная скотоводством				
Степь выпасаемая	98	42	56	0,57
Степь косимая	80	41	39	0,49
Территория, измененная земледелием				
Стерня	103	43	60	0,58
Многолетние травы (люцерна)	98	40	58	0,59
Озимые	102	17	85	0,83
Зябь (вспашка)	78	47	31	0,40

Они показывают, что запасы снеговой воды на сельскохозяйственной территории сильно (на 20-40 %) уменьшаются вследствие уничтожения пышной целинной растительности с большой долей высокостебельных растений и мощной рыхло сложенной "подушки" отмирающих на зиму трав целины, препятствующих сдуванию снега.

На травянистой целине вся влага зимних осадков (в среднем 128 мм) без остатка поглощается почвой, т. е. поверхностный сток отсутствует полностью. Сенокошение и особенно выпас скота резко (в 3 раза) уменьшают просачивание влаги и увеличивают сток до 39-56 мм. На пашне (стерня и озимые) снегозапасы почти как на сенокосах и пастбищах, а уменьшение просачивания влаги

до 43-17 мм увеличивает сток до 58-85 мм (58-83 % от осадков).

Таким образом, скотоводство и земледелие привели к резкому ухудшению водного режима девственной территории. Если на целине все осадки холодного периода поглощались почвой и поверхностный сток отсутствовал, то в агроландшафтах потери зимних осадков за счет снегопереноса и сублимации (испарение) увеличились на 25-50 мм, просачивание уменьшилось на 80-110 мм и сток возрос до 30-85 мм. Уменьшение поступления влаги в почву, таким образом, обусловлено в меньшей степени потерями осадков при снегопереносе и в большей (главной) – снижением инфильтрационной способности почвы.

Уникальные материалы комплексных исследований водного баланса получены на Курском стационаре Института географии РАН, расположенном на территории Центрально-Черноземного государственного заповедника им. проф. В. В. Алехина (табл. 3.19) [113]. В целом они аналогичны данным, полученным в Каменной степи. Кроме того, следует отметить, что с выгонов (выпасаемая степь) в логах (лощинах) при запасах снеговой воды 365 мм средний сток талых вод достигал 240 (!) мм при коэффициенте стока 0,66. Повышенный сток с выгонов наблюдался также на водосборе балки Озерки (Каменная степь), составляя 10-54 (в среднем 33) мм при коэффициенте стока в среднем 0,20 (наши расчеты по публикации И. П. Сухарева [84]).

Таблица 3.19

Весенний водный баланс разных угодий и смыв почвы на Курском стационаре ИГ АН СССР

Угодье, агрофон	Водный баланс, мм			Коэффициент стока	Смыв почвы, мм
	снего-запасы	водопо-глощение	сток		
Дубовый лес	160	157	3,3	0,019	0
Целина	140	130	10,0	0,071	0
Степь выпасаемая	120	74	46,0	0,380	0
Стерня	125	44	81,0	0,360	210
Озимые	110	29	81,0	0,740	430
Зябь (отвальная вспашка)	105	69	36,0	0,340	790

Примечание. Водный баланс в среднем за 1962-1971 гг., смыв почвы – за 1962-1970 гг.

Оценки современного стока талых вод с пашни на европейской территории РФ, выполненные за 68 лет в 1948-2016 гг. ВНИАЛМИ, ИГ АН РАН, ВНИИЗиЗПЭ, Курской ЗОМС, НИИСХ

ЦЧП им. В. В. Докучаева и другими научно-исследовательскими учреждениями РФ, обобщенные нами с использованием материалов Г. П. Сурмача [3, 7, 19], свидетельствуют о значительной разнице в стоке талых вод между естественными (лес, целина) и сельскохозяйственными угодьями (зябь, озимые, многолетние травы и др.).

Отсутствие эрозии (или ничтожный смыв) на естественных угодьях, о котором писали В. В. Докучаев, П. А. Костычев, А. С. Козменко, Г. П. Сурмач и другие исследователи, подтверждается как данными табл. 3.19, так и обобщением Е. А. Гаршинёва [12]. На пахотных угодьях и при интенсивном выпасе скота на выгонах смыв достигает на Русской равнине в среднем 8-10 т/га и более, а в отдельные годы за один ливень может быть смыт весь пахотный горизонт (около 2000 т/га). Появляются и интенсивно растут овраги. Таким образом, антропогенный эрозионно-гидрологический процесс приобретает часто катастрофический характер, приводящий к сильнейшей деградации почвенного покрова и в целом среды обитания живого. Требуется неотложная разработка системы противоэрозионных мероприятий.

3.4.2. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод с сельскохозяйственных угодий на разных видах пашни

Вероятностная оценка речного стока в гидрологии применяется давно. Методы расчета поверхностного стока талых вод с сельхозугодий разной вероятности превышения из-за отсутствия рядов длительных наблюдений за ним не находили широкого применения. Ряды наблюдений за стоком были короткие (9-21 год), поэтому на основе статистического анализа не было возможности рассчитывать теоретические кривые вероятности превышения. Кривые обеспеченности, как правило, строились по эмпирическим точкам, что затрудняло осуществление их экстраполяции. Автором [63] был обобщен большой материал по поверхностному стоку талых вод с рыхлой и уплотненной пашни в зональном плане (лесостепь Западной Сибири, юг ЦРНЗ, ЦЧО, Поволжье и Северный Кавказ) и построены теоретические кривые обеспеченности за период 30-35 лет. При этом были использованы материалы многих ученых страны, в т. ч. результаты исследований нескольких поколений ученых ВНИАЛМИ и его опытной сети, полученные под руководством Г. П. Сурмача, Е. А. Гаршинёва и А. Т. Барабанова.

К сожалению, в последние примерно два десятилетия резко сократилось количество пунктов, на которых проводятся исследования поверхностного стока талых вод на сельскохозяйственных угодьях. В этой связи особую ценность представляют сохранившиеся водно-балансовые стационары с длительными периодами репрезентативных наблюдений в опытной сети ФНЦ агроэкологии РАН (бывший ВНИАЛМИ) в лесостепной, степной и полупустынной зонах европейской части РФ.

Мы дополнительно обобщили материалы, полученные за последние 26 лет (1991-2016) с учетом прежних обобщений автора. Сейчас имеются длительные ряды наблюдений (60-68 лет) за поверхностным стоком, которые позволяют осуществлять статистическую обработку полученных данных и строить теоретические кривые вероятности превышения стока. Необходимость дополнительного обобщения продиктована тем, что в предыдущих работах длина рядов наблюдений была недостаточной для характеристики поверхностного стока и его вероятностной оценки. Тем более в последние десятилетия произошли существенные изменения как климатические (наступил маловодный период, поверхностный сток практически отсутствовал), так и в хозяйственной деятельности (сокращение площади пашни, изменение структуры посевных площадей, применение новых агротехнологий, снижение общего уровня культуры земледелия и т. д.), что сильно повлияло на его формирование и статистические параметры. Эти данные позволили точнее подойти к оценке поверхностного стока талых вод и роли природных и антропогенных факторов в его формировании.

Особенностью рядов наблюдений за поверхностным стоком является наличие в них нулевых значений. Для математической обработки таких неоднородных совокупностей был применен способ, изложенный А. В. Рождественским [114]. Этот способ предусматривает построение кривой обеспеченности по ряду наблюдений без нулевых значений на основе определения показателей средней величины стока, коэффициента вариации и коэффициента ассиметрии с использованием таблицы Фостера-Рыбкина [36]. Для перехода к кривой обеспеченности, соответствующей совокупности с нулевыми значениями, используется формула [114]

$$P_{(x)} = \frac{P_1(x) \cdot n_1}{n_1 + n_2}, \qquad (52)$$

где $P_{(x)}$, $P_{1(x)}$ – вероятности превышения, соответствующие сум-

марной совокупности с нулевыми значениями и без них; n_1, n_2 – объем совокупности без нулевых и с нулевыми значениями.

Такой способ обработки данных позволил построить теоретические кривые вероятности превышения стока, которые хорошо аппроксимируют эмпирические точки исследуемых рядов (см. рис. 3.5), и вычислить показатели стока разной вероятности превышения (см. табл. 3.16).

В ФНЦ агроэкологии РАН в результате многолетних (60-68 лет) исследований элементов водного баланса по трем опытным эрозионным объектам, расположенным в трех географических зонах (лесостепная с серыми почвами, степная с обыкновенными черноземами и каштановыми почвами и полупустынная 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.

Юг ЦРНЗ, Орловская обл. Поверхностный сток талых вод в лесостепной зоне на серых лесных почвах Орловской обл. начали изучать еще в 1923 г. под руководством А. С. Козменко, а затем работы были прекращены из-за начала Великой Отечественной войны и возобновлены в 1958 г. по инициативе профессора Г. П. Сурмача. Наблюдения за стоком талых вод в период с 1923 по 1941 г. проводили на водосборах площадью от 50 до 500 га. По данным А. С. Козменко и А. Д. Ивановского [3], показатели стока с водосборов в среднем составляли 70-80 мм при максимуме 100 мм. Коэффициент стока колебался от 0,70 до 0,93, в среднем составлял 0,85. Максимальный модуль стока достигал 11 л/с с 1 га, а средняя его величина составляла 3 л/с. На основании этих данных не представляется возможным охарактеризовать весенний сток с различных видов пашни.

Исследования после 1958 г. позволили дифференцировать данные по стоку на разных видах пашни – рыхлой и уплотненной, что очень важно знать при разработке систем адаптивно-ландшафтного земледелия на расчетной основе. Рассмотрим фактические данные по стоку с различных видов пашни за период 1959-2016 гг. Исследования проводили Г. П. Сурмач, В. Н. Дьяков, В. Л. Сухов, Л. Я. Королёва, Е. А. Гаршинёв, А. Т. Барабанов, Н. Е. Петелько, А. И. Петелько, В. П. Борец, Е. Я. Тубольцев, В. А. Иванова, О. В. Богачёва и др. Сведения о весеннем поверхностном стоке и влагозапасах в снеге приведены в табл. 3.20.

Таблица 3.20

Средние показатели поверхностного стока талых вод и запасов снеговой воды на серых лесных почвах лесостепи, Орловская обл.

Год	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока
	рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6	7
1959	108	146	0,74	106	135	0,78
1960	81	136	0,60	117	150	0,78
1961	7	32	0,22	12	22	0,54
1962	13	22	0,59	21	23	0,91
1963	61	116	0,53	71	115	0,62
1964	58	121	0,48	91	113	0,80
1965	51	70	0,73	46	60	0,77
1966	4	77	0,05	3	105	0,03
1967	146	186	0,78	186	186	1,00
1968	0	169	0	26	145	0,18
1969	24	66	0,36	51	80	0,64
1970	83	192	0,43	94	221	0,42
1971	79	129	0,61	39	81	0,48
1972	15	56	0,27	15	56	0,27
1973	29	62	0,47	31	53	0,59
1974	29	50	0,58	44	49	0,89
1975	0	86	0	0	89	0
1976	0	137	0	3	160	0,02
1977	12	138	0,09	20	149	0,41
1978	0	91	0	20	177	0,11
1979	37	128	0,29	45	135	0,33
1980	29	135	0,21	42	153	0,27
1981	0	162	0	15	132	0,11
1982	2	100	0,02	5	100	0,05
1983	2	97	0,02	27	91	0,29
1984	12	41	0,29	18	67	0,27
1985	0	128	0	2	119	0,02
1986	33	77	0,43	36	175	0,48
1987	27	149	0,18	40	160	0,25
1988	21	118	0,18	42	123	0,34
1989	0	55	0	0	52	0
1990	23	44	0,51	25	49	0,51
1991	34	84	0,40	52	89	0,58
1992	0	88	0	0	85	0
1993	17	42	0,40	14	45	0,31
1994	40	139	0,29	50	142	0,35
1995	0	114	0	4	118	0,03

Продолжение табл. 3.20

1	2	3	4	5	6	7
1996	29	81	0,36	26	89	0,29
1997	1	56	0,02	26	71	0,37
1998	0	48	0	-	-	-
1999	0	144	0	-	-	-
2000	0	57	0	-	-	-
2001	0	81	0	-	-	-
2002	0	58	0	-	-	-
2003	46	96	0,48	71	152	0,47
2004	0	86	0	0	97	0
2005	0	115	0	0	115	0
2006	0	137	0	0	111	0
2007	0	79	0	0	62	0
2008	0	76	0	0	83	0
2009	0	97	0	0	102	0
2010	0	106	0	0	100	0
2011	0	122	0	0	107	0
2012	0	86	0	0	78	0
2013	0	122	0	0	144	0
2014	0	26	0	0	25	0
2015	0	43	0	0	42	0
2016	0	53	0	0	65	0
Сред-нее	20	96	0,21	30	103	0,29

Примечание. При обобщении использовались данные, приведенные в работах Г. П. Сурмача, Е. А. Гаршинёва, А. Т. Барабанова, Н. Е. Петелько, А. И. Петелько, Е. Я. Тубольцева, В. А. Ивановой, О. В. Богачёвой, В. П. Борца.

Обобщенные данные за многолетний период показали, что очень сильный сток талых вод (по шкале интенсивности Г. П. Сурмача) на рыхлой пашне (зябь отвальная) был 3 года из 58, сильный – 5 лет, умеренный –14, слабый – 5, очень слабый – 4 года, а 27 лет сток отсутствовал. На уплотненной пашне (многолетние травы, озимые и др.) за указанный период 10 лет поверхностного стока не было. В остальные годы величина стока была разной интенсивности. За 58 лет средняя величина поверхностного стока с рыхлой пашни составила 20 мм, коэффициент стока 0,21, запасы снеговой воды 96 мм. Эти показатели на уплотненной пашне, в сравнении с отвальной зябью, были несколько выше и равнялись соответственно 30 мм; 0,29; 103 мм. Сток с уплотненной пашни, по сравнению с

зяблевой вспашкой, был выше всего на 10 мм. Гидрологическая роль зяби здесь значительно ниже, чем в степной и полупустынной зонах. Даже в годы низкой вероятности превышения (р = 0,01 %) различие в величине стока не превышает 50 мм. Это соответствует ранее установленной учеными Института географии РАН зональной зависимости стока в лесной зоне [113].

Ход динамики весеннего стока на рыхлой и уплотненной пашне представлен на рис. 3.8. По нему видно, что поверхностный сток в значительной степени колеблется по годам и явно наблюдается тенденция его устойчивого снижения от 1959 к 2016 г., особенно в последние почти 20 лет.

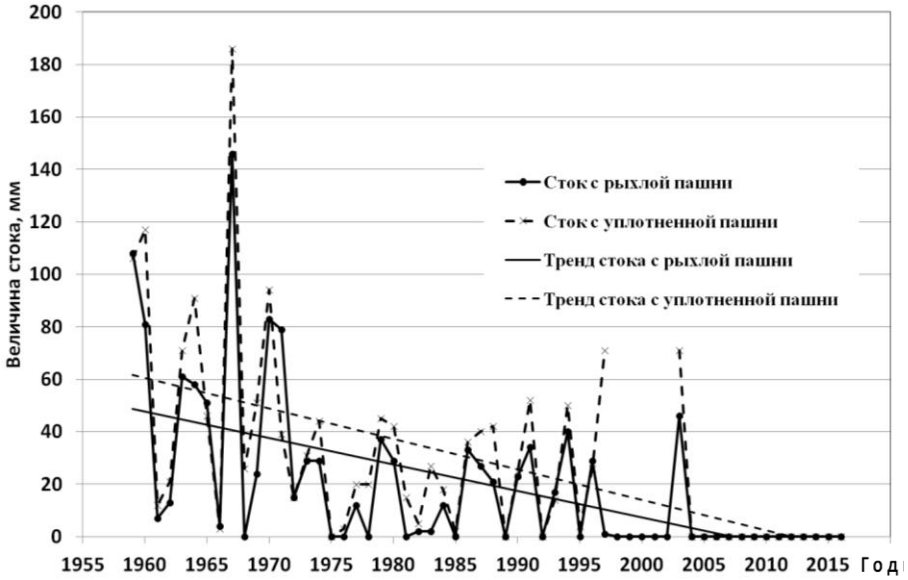


Рис. 3.8. Динамика поверхностного стока талых вод на серых лесных почвах лесостепи

По полученным многолетним данным нами рассчитаны и построены теоретические кривые вероятности превышения склонового стока для центральной лесостепи на серых лесных почвах с рыхлой и уплотненной пашни (рис. 3.9).

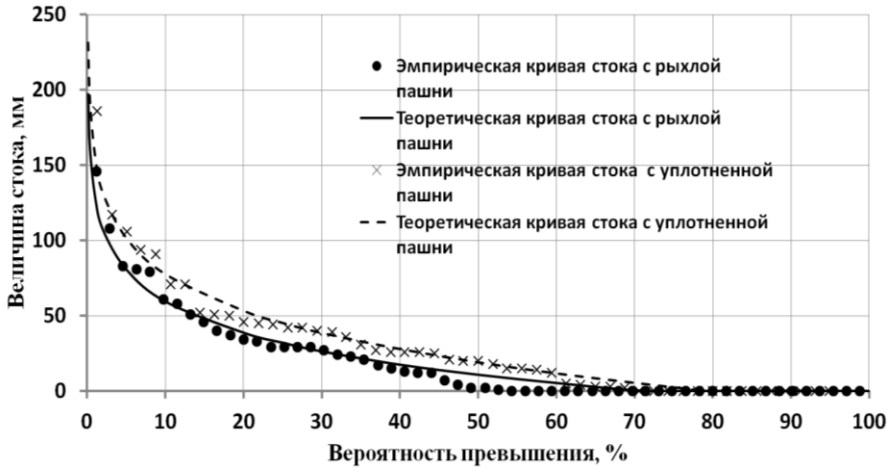


Рис. 3.9. Кривые вероятности превышения поверхностного стока талых вод с рыхлой и уплотненной пашни на серых лесных почвах Орловской обл.

На графике видно, что на рыхлой пашне сток 20 %-ной вероятности превышения составляет 39 мм, а 70 %-ной обеспеченности – около 1 мм. На уплотненной пашне сток 70 %-ной обеспеченности превышает 7 мм, 20 %-ной – больше 50 мм. Отсюда следует, что уплотненная пашня способствует незначительному увеличению стока талых вод по сравнению с рыхлой пашней.

Таким образом, в многолетних исследованиях выявлены нормативные величины поверхностного стока на рыхлой пашне и с уплотненной пашни. Полученные научные материалы являются необходимыми для расчетных методов разработки и проектирования противоэрозионных комплексов.

ЦЧО, Курская обл., лесостепь, темно-серая лесная почва и выщелоченный чернозем. К сожалению, для этого региона у нас нет данных инструментальных наблюдений за поверхностным стоком талых вод дифференцированно на разных видах пашни за период с 1982 по 2016 г. на темно-серой лесной почве и с 1989 по 2016 г. на выщелоченном черноземе. Поэтому мы восстановили их путем установления корреляционных связей. Это допущение несколько снижает точность определения величины стока в годы, когда он формируется. Годы, когда он отсутствует, определяются с высокой точностью. Осредненные показатели поверхностного стока и запасов снеговой воды на темно-серых лесных почвах и выщелоченных черноземах в лесостепи Курской обл. приведены в табл. 3.21. Они показывают, что на рыхлой пашне сток формируется значительно реже, чем на уплотненной пашне, и величина его меньше. Так, на рыхлой пашне стока не было на темно-серой лесной почве 23 года, а на уплотненной пашне – 18 лет из 45. На выщелоченном черноземе сток не сформировался на рыхлой пашне 26 лет из 47, а на уплотненной пашне – 15 лет из 41. Средняя величина стока с рыхлой пашни на темно-серой лесной почве за 45 лет составила 20 мм, а с уплотненной – 37 мм. На выщелоченном черноземе эти показатели были 15 и 37 мм соответственно. В значительной степени величина стока колебалась по годам. На рис. 3.10 приведена динамика стока талых вод за 45 и 47 лет соответственно. Линии тренда показывают, что в целом величина стока с годами уменьшается, а в последние почти 20 лет он совсем не формировался.

Теоретические кривые вероятности превышения поверхностного стока для темно-серых лесных почв и выщелоченных черноземов с рыхлой и уплотненной пашни приведены на рис. 3.11. Они позволили определить показатели стока разной обеспеченности, необ-

Таблица 3.21

Средние показатели поверхностного стока и запасов снеговой воды на темно-серых лесных почвах и выщелоченных черноземах в лесостепи Курской обл.

Год	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока
	рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6	7
Темно-серая лесная почва						
1961	18	42	0,43	(31)	-	-
1962	3	43	0,07	(37)	-	-
1963	54	70	0,77	(104)	-	-
1964	82	113	0,73	(114)	-	-
1965	11	63	0,18	(41)	-	-
1966	38	126	0,30	(58)	-	
1967	46	108	0,43	(90)	-	-
1968	0	-	0	(26)	-	-
1969	18	36	0,50	(51)	-	-
1970	135	185	0,73	(180)	-	-
1971	28	36	0,78	(46)	-	-
1972	4	16	0,25	12	27	0,44
1973	22	44	0,50	42	50	0,84
1974	24	76	0,32	23	73	0,31
1975	0	48	0	27	93	0,29
1976	3	128	0,02	42	146	0,29
1977	25	132	0,19	65	157	0,41
1978	81	100	0,81	108	186	0,58
1979	63	80	0,19	108	154	0,70
1980	52	80	0,65	92	119	0,77
1981	25	134	0,19	84	128	0,66
1982	54	112	0,48	50	129	0,39
1983	(2)	-	-	(49)	-	-
1984	(14)	-	-	(28)	-	-
1985	(0)	-	-	(2)	-	-
1986	(38)	-	-	(56)	-	-
1987	(31)	-	-	(63)	-	-
1988	(24)	-	-	(66)	-	-
1989	(0)	-	-	(0)	-	-
1990	(27)	-	-	(39)	-	-
1991	(39)	-	-	(82)	-	-
1992	(0)	-	0	(0)	-	0
1993	(20)	-	-	(22)	-	-
1994	(46)	-	-	(78)	-	-

Продолжение табл. 3.21

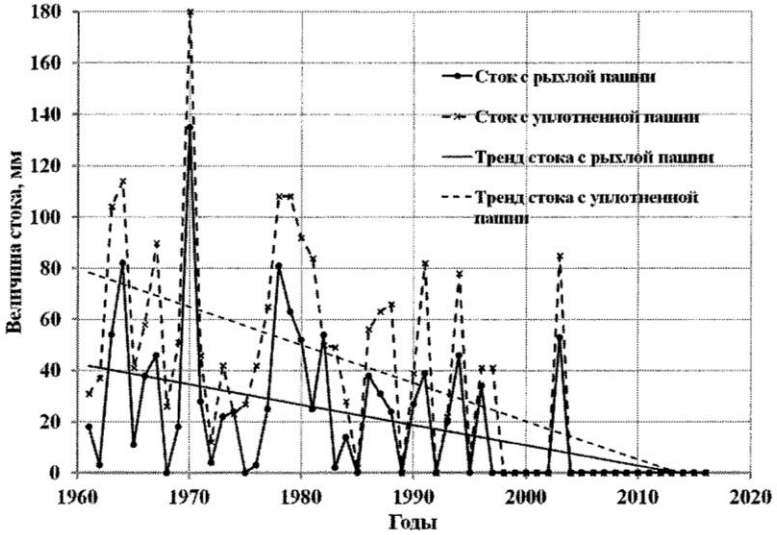
1	2	3	4	5	6	7
1995	(0)	-	0	(6)	-	-
1996	(34)	-	-	(41)	-	-
1997	(0)	-	0	(41)	-	-
1998	(0)	-	0	(0)	-	0
1999	(0)	-	0	(0)	-	0
2000	(0)	-	0	(0)	-	0
2001	(0)	-	0	(0)	-	0
2002	(0)	-	0	(0)	-	-
2003	(53)	-	-	(85)	-	-
2004	(0)	-	0	(0)	-	0
2005	(0)	-	0	(0)	-	0
2006	(0)	-	0	(0)	-	0
2007	(0)	-	0	(0)	-	0
2008	(0)	-	0	(0)	-	0
2009	(0)	-	0	(0)	-	0
2010	(0)	-	0	(0)	-	0
2011	(0)	-	0	(0)	-	0
2012	(0)	-	0	(0)	-	0
2013	(0)	-	0	(0)	-	0
2014	(0)	-	0	(0)	-	0
2015	(0)	-	0	(0)	-	0
2016	(0)	-	0	(0)	-	0
Среднее	20	84	0,24	37	115	0,32
Выщелоченный чернозем						
1959	28	46	0,61	49	60	0,82
1960	58	116	0,50	140	154	0,91
1961	0	15	0	6	8	0,79
1962	18	36	0,50	14	45	0,31
1963	27	117	0,23	104	140	0,74
1964	11	151	0,07	118	166	0,71
1965	27	97	0,28	62	94	0,66
1966	1	111	0,01	42	137	0,31
1967	61	140	0,44	117	170	0,69
1968	0	185	0	95	189	0,50
1969	26	72	0,36	48	79	0,61
1970	98	187	0,52	207	222	0,93
1971	26	40	0,65	26	40	0,65
1972	0	12	0	3	16	0,18
1973	10	22	0,48	13	25	0,52
1974	15	58	0,26	9	17	0,53

Окончание табл. 3.21

1	2	3	4	5	6	7
1975	0	43	0	7	70	0,10
1976	0	185	0	12	120	0,10
1977	3	158	0,02	40	78	0,51
1978	15	94	0,16	54	106	0,51
1979	74	124	0,60	115	-	-
1980	58	110	0,53	70	101	0,69
1981	25	134	0,19	104	136	0,76
1982	54	112	0,48	54	129	0,42
1983	19	87	0,22	23	105	0,22
1984	1	26	0,04	8	47	0,16
1985	10	114	0,09	25	108	0,23
1986	21	72	0,29	29	54	0,54
1987	23	116	0,20	37	122	0,30
1988	65	104	0,62	67	100	0,67
1989	(0)	-	-	(0)	-	0
1992	(0)	-	-	(0)	-	0
1995	(0)	-	-	(4)	-	-
1997	(0)	-	0	-	-	-
1998	(0)	-	0	-	-	-
1999	(0)	-	0	-	-	-
2000	(0)	-	0	-	-	-
2001	(0)	-	0	-	-	-
2002	(0)	-	0	-	-	-
2004	(0)	-	0	(0)	-	0
2005	(0)	-	0	(0)	-	0
2006	(0)	-	0	(0)	-	0
2007	(0)	-	0	(0)	-	0
2008	(0)	-	0	(0)	-	0
2009	(0)	-	0	(0)	-	0
2010	(0)	-	0	(0)	-	0
2011	(0)	-	0	(0)	-	0
2012	(0)	-	0	(0)	-	0
2013	(0)	-	0	(0)	-	0
2014	(0)	-	0	(0)	-	0
2015	(0)	-	0	(0)	-	0
2016	(0)	-	0	(0)	-	0
Среднее	15	96	0,16	37	98	0,38

Примечание. В скобках указаны восстановленные данные, полученные путем установления корреляционных связей.

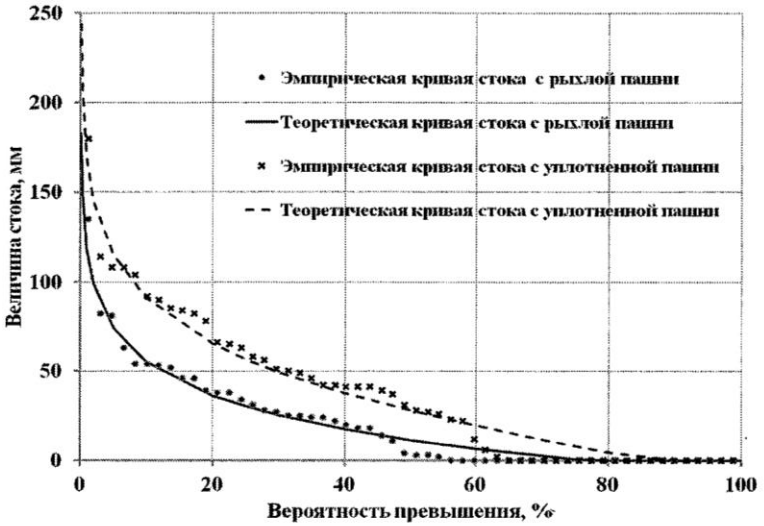
а)



б)

Рис. 3.10. Динамика стока на темно-серых лесных почвах (а) и выщелоченных черноземах (б) Курской обл.

а)



б)

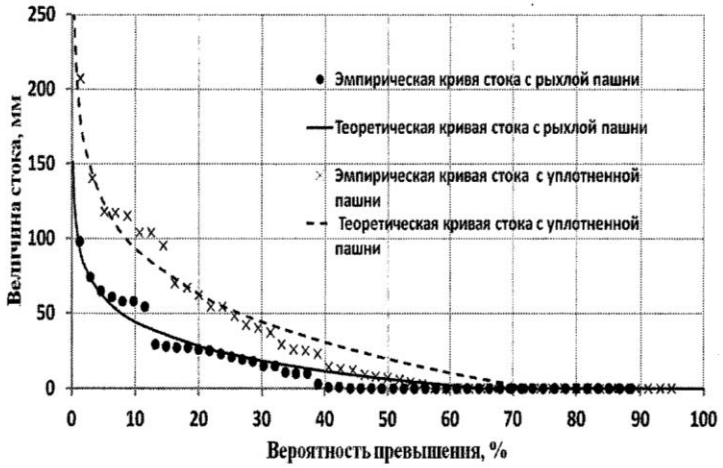


Рис. 3.11. Кривые вероятности превышения стока на темно-серых лесных почвах (а) и выщелоченных черноземах (б) Курской обл.

ходимые для расчета стока при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия. На графиках видны большие различия в величинах стока с рыхлой и уплотненной пашни. Они также показывают, что на уплотненной пашне поверхностный сток формируется почти ежегодно (7-9 лет из 10), а на рыхлой пашне только каждые 3-4 года и значительно меньший по величине. В очень многоводные по стоку вёсны сохраняется существенное различие в величине стока. Сток 10 %-ной вероятности превышения с рыхлой пашни составляет 25 мм, с уплотненной – 75 мм.

ЦЧО, Воронежская обл., степь, обыкновенный чернозем. В этом регионе исследования проводились в Каменной степи НИИСХ ЦЧП им. В. В. Докучаева. Они были ранее (до 1981 г.) обобщены автором. В последующие годы инструментальных наблюдений за стоком на сельскохозяйственных угодьях, к сожалению, не было. В большинстве этих лет поверхностный сток талых вод здесь не сформировался в связи с тем, что почва в эти годы на всей европейской части РФ была талая или промерзала на небольшую глубину. По этим показателям мы восстановили годы без стока по пунктам-аналогам. Таким образом, ряды по стоку с рыхлой и уплотненной пашни были удлинены на 21 год (табл. 3.22).

Таблица 3.22

Средние показатели поверхностного стока и запасов снеговой воды на обыкновенных черноземах в степи Воронежской обл.

Год	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока
	рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6	7
1948	22	71	0,31	-	-	-
1949	2	85	0,02	38	88	0,29
1950	2	57	0,04	9	53	0,17
1951	3	62	0,05	31	109	0,28
1952	48	103	0,47	76	104	0,73
1953	68	106	0,64	92	108	0,85
1954	1	21	0,05	13	47	0,28
1955	73	162	0,45	109	162	0,67
1956	4	74	0,05	100	154	0,65
1957	97	119	0,82	97	119	0,82
1958	6	90	0,07	74	106	0,70
1959	1	43	0,02	54	111	0,49
1960	5	16	0,31	29	60	0,48
1961	0	(63)	0	40	63	0,64
1962	2	48	0,04	25	74	0,34

Продолжение табл. 3.22

1	2	3	4	5	6	7
1963	60	137	0,44	101	120	0,84
1964	1	134	0,01	85	151	0,56
1965	6	57	0,11	14	39	0,36
1966	0	67	0	51	-	-
1967	0	147	0	21	-	-
1968	13	32	0,41	84	133	0,63
1969	0	0	0	36	89	0,40
1970	3	43	0,08	(95)	-	-
1971	14	26	0,53	19	34	0,56
1972	0	46	0	(0)	-	-
1973	0	26	0	(10)	-	-
1974	24	45	0,53	-	-	-
1975	0	58	0	(7)	-	-
1976	0	-	-	(10)	-	-
1977	2	-	-	(41)	-	-
1978	-	-	-	(40)	-	-
1979	-	-	-	37	-	-
1980	-	-	-	117	-	-
1981	-	-	-	11	-	-
1989	0	-	0	0	-	0
1992	0	-	0	0	-	0
1995	0	-	0	0	-	0
1998	0	-	0	-	-	-
1999	0	-	0	-	-	-
2000	0	-	0	-	-	-
2001	0	-	0	-	-	-
2002	0	-	0	-	-	-
2004	0	-	0	0	-	0
2005	0	-	0	0	-	0
2006	0	-	0	0	-	0
2007	0	-	0	0	-	0
2008	0	-	0	0	-	0
2009	0	-	0	0	-	0
2010	0	-	0	0	-	0
2011	0	-	0	0	-	0
2012	0	-	0	0	-	0
2013	0	-	0	0	-	0
2014	0	-	0	0	-	0
2015	0	-	0	0	-	0
2016	0	-	0	0	-	0
Среднее	9	70	0,13	32	96	0,33

Анализ этих данных показал, что сток на обыкновенном черноземе ЦЧО формируется реже и величина его меньше, чем на выщелоченном черноземе. Средняя величина его на рыхлой пашне за 54 года составила 9, а на выщелоченном черноземе 15 мм. На уплотненной пашне эти показатели были соответственно 32 и 37 мм.

На обыкновенном черноземе на рыхлой пашне 29 лет из 54 сток отсутствовал, 5 лет он был сильный (48-97 мм), 4 года умеренный (14-24 мм) и 13 лет слабый (1-6 мм). На уплотненной пашне сток был очень сильный 10 лет из 49, 4 года сильный (25-38 мм), 3 года умеренный (21-25 мм) и 5 лет слабый (7-14 мм).

Ход динамики весеннего стока на рыхлой и уплотненной пашне показывает, что поверхностный сток сильно колеблется по годам и отмечается тенденция его устойчивого снижения от 1948 к 2016 г., особенно в последние два десятилетия (рис. 3.12).

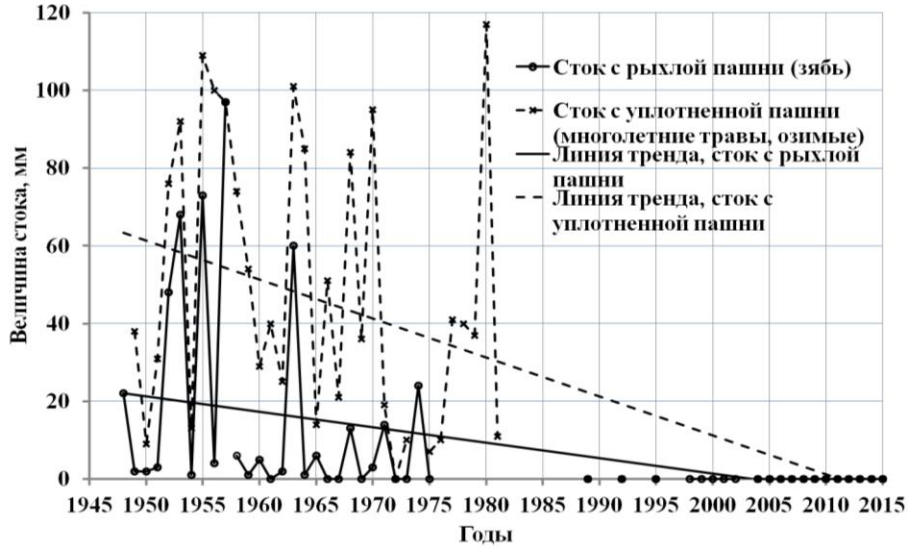


Рис. 3.12. Динамика стока на обыкновенных черноземах Воронежской обл.

По полученным многолетним данным нами рассчитаны и построены теоретические кривые вероятности превышения поверхностного стока для обыкновенного чернозема с рыхлой и уплотненной пашни (рис. 3.13). На графике видно, что на рыхлой пашне сток 10 %-ной вероятности превышения составляет 38 мм, 50 %-ной – 3 мм, а 70 %-ной обеспеченности – около 0 мм. На уплотненной пашне эти показатели соответственно были 78, 19 и 5 мм.

Среднее Поволжье, Самарская обл. Исследования поверхностного стока талых вод и других элементов весеннего баланса в степной зоне на обыкновенном черноземе Самарской обл. были начаты Г. П. Сурмачем в 1952 г. на полях Тимашевского агролесомелиоративного опорного пункта в составе комплексной экспедиции

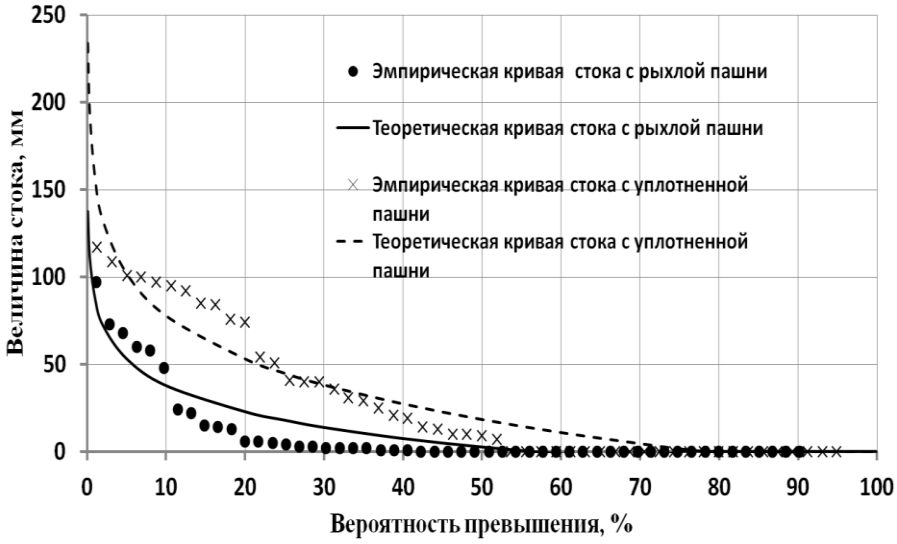


Рис. 3.13. Кривые вероятности превышения стока на обыкновенных черноземах Воронежской обл.

Почвенного института им. В. В. Докучаева. Позднее они были продолжены под его руководством научными сотрудниками Поволжской АГЛОС ВНИАЛМИ [7, 10]. В разные годы (1959-1963) этой проблемой занимались также В. С. Бобров, Н. В. Надеждина, Л. Г. Богаченко, В. П. Пастушков, В. И. Панов. Последние 52 года исследования проводил В. И. Панов. Получен непрерывный (1959-2016 гг.) гидрологический ряд наблюдений (табл. 3.23).

Таблица 3.23

Средние показатели поверхностного стока и запасов снеговой воды на обыкновенных черноземах в степи Самарской обл.

Год	Сток, мм	Запас снеговой воды, мм	Коэффициент стока	Сток, мм	Запас снеговой воды, мм	Коэффициент стока
	рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6	7
1959	0	65	0	32	278	0,12
1960	0	78	0	53	137	0,39
1961	0	68	0	27	120	0,23
1962	0	51	0	11	65	0,17
1963	0	104	0	12	138	0,09
1964	34	170	0,20	58	140	0,41
1965	2	93	0,02	49	135	0,36
1966	27	136	0,20	50	188	0,27
1967	0	51	0	18	110	0,16
1968	24	109	0,22	81	189	0,43
1969	0	58	0	6	74	0,08
1970	16	98	0,16	86	117	0,74
1971	5	45	0,11	44	74	0,59
1972	1	123	0,01	26	98	0,27
1973	8	52	0,15	54	111	0,49
1974	12	106	0,11	65	103	0,60

Продолжение табл. 3.23

1	2	3	4	5	6	7
1975	0	66	0	37	81	0,46
1976	0	114	0	15	79	0,19
1977	1	70	0,01	43	139	0,31
1978	11	112	0,10	30	145	0,21
1979	32	199	0,16	127	164	0,77
1980	17	165	0,10	56	142	0,39
1981	9	154	0,06	50	123	0,41
1982	3	57	0,05	65	87	0,75
1983	8	110	0,08	55	103	0,53
1984	0	114	0	26	97	0,27
1985	52	167	0,31	88	123	0,72
1986	13	154	0,08	75	112	0,67
1987	3	228	0,01	42	214	0,20
1988	54	181	0,30	98	116	0,84
1989	0	192	0	17	185	0,09
1990	14	131	0,11	54	137	0,39
1991	12	113	0,11	60	118	0,54
1992	0	141	0	23	137	0,17
1993	0	118	0	7	110	0,06
1994	4	115	0,03	27	138	0,20
1995	0	128	0	-	-	-
1996	0	131	0	-	-	-
1997	40	195	0,20	-	-	-
1998	0	207	0	-	-	-
1999	0	157	0	-	-	-
2000	0	154	0	-	-	-
2001	0	134	0	30	142	0,21
2002	0	128	0	0	117	0
2003	0	134	0	0	154	0
2004	0	124	0	0	102	0
2005	12	112	0,10	41	154	0,27
2006	0	78	0	19	84	0,23
2007	0	91	0	0	109	0
2008	0	121	0	0	139	0
2009	0	50	0	0	63	0
2010	0	112	0	-	-	-
2011	0	128	0	0	126	0
2012	0	148	0	0	137	0
2013	0	129	0	0	138	0
2014	0	115	0	0	182	0
2015	0	98	0	0	162	0
2016	0	105	0	0	174	0
Среднее	7	117	0,06	36	128	0,28

Анализ полученных материалов показывает, что величины поверхностного стока талых вод и других элементов водного баланса в Самарской обл. отличаются большой изменчивостью, большой амплитудой колебаний, чередованием лет (вёсен) разной водности – от очень маловодных (величина стока от 0-5 мм) до очень многоводных (сток 50-70 мм и более). Из 58 лет стока с рыхлой пашни не было 33 года, сильный сток был 2 года, умеренный – 5 лет, слабый – 11, очень слабый – 7 лет. На уплотненной пашне за 51 год поверхностного стока не было 12 лет. В остальные годы величина стока была разной интенсивности: чрезвычайно сильный сток был 1 год, очень сильный – 4, сильный – 17, умеренный – 7, слабый – 8, очень слабый – 2 года. Отмечается большая гидрологическая роль зяблевой пахоты (глубокого рыхления почвенного слоя) по сравнению с уплотненной пашней. В среднем за 58 лет слой стока с зяби составил всего 7 мм, в то время как на угодьях с уплотненной почвой сток был в 5,1 раза больше (36 мм). На рыхлой пашне среднемноголетняя величина впитавшейся талой воды достигла 112 мм, а на уплотненной – 92 мм, т. е. за счет рыхлости сложения пахотного слоя поглощено 20 мм.

Ход динамики величин стока в исследуемый период представлен на рис. 3.14. Он подтверждает наличие определенных условий в появлении многоводных и маловодных периодов формирования поверхностного стока, а в последние два десятилетия почти полное его отсутствие, что связано со слабым промерзанием почвы и грунта.

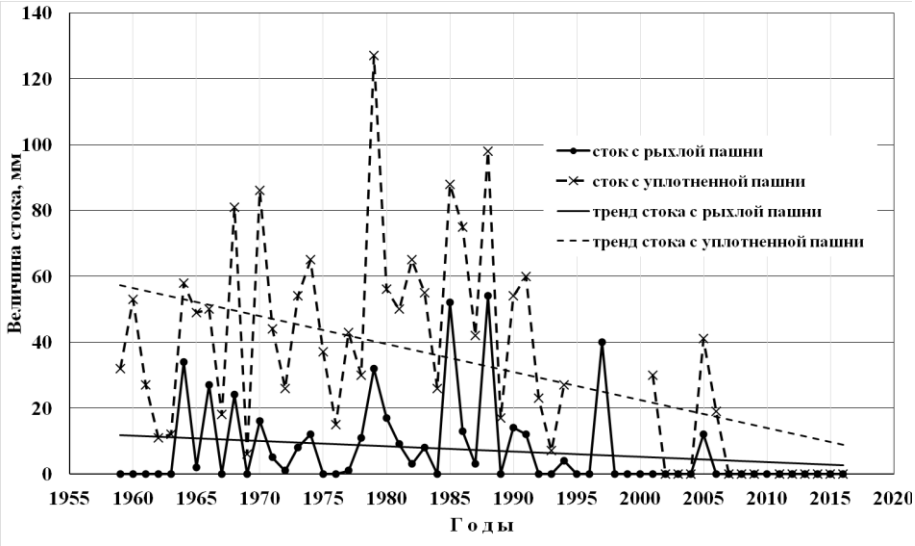


Рис. 3.14. Динамика поверхностного стока талых вод с рыхлой и уплотненной пашни на обыкновенных черноземах Самарской обл.

Приведенные материалы дают представление и о водопоглощении. Среднемноголетняя величина инфильтрации (впитывание, водопоглощение) на зяби составила 118 мм, а на угодьях с

уплотненной почвой – 85, или на 33 мм меньше.

Полученные многолетние статистические ряды по поверхностному стоку позволили построить теоретические кривые вероятности превышения поверхностного стока талых вод (рис. 3.15). Они показывают, что на уплотненной пашне поверхностный сток формируется почти ежегодно (8-9 лет из 10), а на отвальной глубокой зяби (25-28 см) только каждые 4-5 лет и значительно меньший по величине. В очень многоводные вёсны при вероятности превышения 0,01 % сохраняется существенное различие по величине стока в 80-85 мм. Сток 10 %-ной вероятности превышения с зяби составляет 25 мм, с уплотненной почвы – 75 мм.

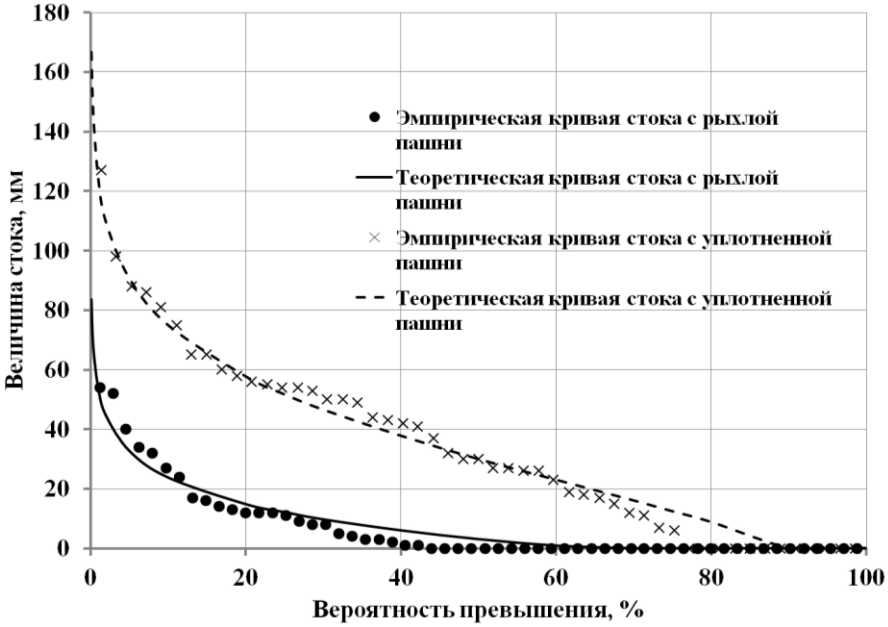


Рис. 3.15. Кривые вероятности превышения поверхностного стока талых вод с рыхлой и уплотненной пашни на обыкновенных черноземах Самарской обл.

Нижнее Поволжье, Волгоградская обл., каштановые и темно-каштановые почвы. Ниже даны обобщенные нами результаты многолетних исследований поверхностного стока и других элементов весеннего водного баланса на двух объектах ФНЦ агроэкологии РАН, расположенных в районе г. Камышина (каштановые почвы) и ст-цы Клетской (темно-каштановые почвы) [5, 115-117]. Также были использованы материалы исследований, полученные под руководством автора на Камышинском опорном пункте ВНИАЛМИ (сейчас Нижневолжская станция по селекции древесных пород – филиал ФНЦ агроэкологии РАН) В. И. Антоновым, на Клетском опорном пункте ВНИАЛМИ (Клетская НИАГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН) Ю. М. Суковатовым и А. И. Узолиным. В результате обобщения имеющиеся до сих пор ряды наблюдений удлинены на 26 лет. Материалы этих обобщений приведены в табл. 3.24.

Таблица 3.24

Средние показатели поверхностного стока талых вод и запасов снеговой воды на каштановых и темно-каштановых почвах в степи Волгоградской обл.

Год	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока
	рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	2	3	4	5	6	7
Камышинский р-н, каштановая почва						
1946	7	-	-	32	60	0,53
1947	2	77	0,03	38	79	0,48
1948	13	50	0,26	38	62	0,61
1949	0	31	0	5	57	0,07
1950	0	-	0	14	-	-
1951	3	-	-	30	-	-
1952	0	-	0	20	-	-
1953	0	-	0	20	-	-
1954	0	-	0	14	-	-
1955	5	-	-	30	-	-
1956	12	-	-	30	-	-
1957	27	-	-	75	-	-
1958	7	-	-	28	-	-
1959	0	-	0	20	-	-
1960	4	90	0,04	47	80	0,59
1961	2	46	0,04	23	50	0,46
1962	4	37	0,11	19	47	0,40
1963	4	85	0,05	88	107	0,82
1964	1	61	0,02	12	71	0,17
1965	10	-	-	30	-	-
1966	0	-	-	9	-	-
1967	0	108	0	0	99	0
1968	0	122	0	1	109	0,01
1969	17	52	0,33	30	50	0,60
1970	21	115	0,18	70	108	0,65
1971	30	52	0,58	45	62	0,73
1972	0	14	0	0	21	0
1973	0	-	0	0	-	0
1974	4	47	0,09	2	67	0,03
1975	1	92	0,01	2	92	0,02
1976	0	-	0	50	-	-
1977	1	51	0,02	-	-	-
1978	5	49	0,10	-	-	-
1979	11	106	0,10	-	-	-
1980	2	64	0,03	-	-	-

Продолжение табл. 3.24

1	2	3	4	5	6	7
1981	6	23	0,26	-	-	-
1982	3	49	0,06	8	47	0,17
1983	29	52	0,56	45	54	0,82
1984	0	18	0	2	28	0,11
1985	0	(65)	0	19	65	0,29
1986	38	54	0,71	45	71	0,63
1987	0	159	0	17	152	0,11
1988	21	47	0,45	32	81	0,40
1989	4	87	0,09	12	49	0,24
1990	19	40	0,48	33	40	0,83
1991	-	-	-	11	48	0,21
1992	0	44	0	0	42	0
1993	0	22	0	0	26	0
Клетский р-н, темно-каштановая почва						
1996	0	48	0	0	48	0
1997	0	19	0	0	19	0
1998	0	35	0	0	35	0
1999	-	-	-	10	27	0,37
2000	0	31	0	0	31	0
2001	0	17	0	0	17	0
2002	0	29	0	0	29	0
2003	-	-	-	26	80	0,30
2004	0	-	0	0	-	0
2005	0	28	0	0	(28)	0
2006	0	43	0	0	(43)	0
2007	0	51	0	0	(51)	0
2008	0	22	0	0	(22)	0
2009	0	(23)	0	0	23	0
2010	0	14	0	0	(14)	0
2011	0	10	0	0	(10)	0
2012	0	55	0	0	(55)	0
2013	0	14	0	0	(14)	0
2014	0	25	0	0	(25)	0
2015	0	21	0	0	(21)	0
2016	0	(10)	0	0	(10)	0
Среднее	5	50	0,10	17	52	0,33

Примечание. В скобках указаны показатели, полученные путем установления корреляционных связей.

Анализ многолетних данных показал, что сток талых вод на рыхлой пашне (зябь отвальная) 54 года из 66 отсутствовал или был

очень слабый (до 7 мм), слабый сток был 6 лет и умеренный – 6 лет. На уплотненной пашне (многолетние травы, озимые и др.) 27 лет из 63 поверхностного стока не было совсем или он был очень слабый, 14 лет – слабый, 13 лет – умеренный, 7 лет – сильный и очень сильный. Средняя величина поверхностного стока с рыхлой пашни – 5 мм, коэффициент стока 0,10, запасы снеговой воды – 50 мм, а с уплотненной пашни эти показатели были соответственно 17 мм; 0,33; 52 мм. Разница в стоке с уплотненной и рыхлой пашни была всего 12 мм. Динамика поверхностного стока талых вод за 71 год представлена на рис. 3.16. Он показывает, что поверхностный сток сильно колеблется по годам от 0 до 38 мм на рыхлой пашне и от 0 до 88 на уплотненной. Тренд его динамики за период от 1946 до 2016 г. указывает на значительное снижение стока от начала периода к его концу, особенно на уплотненной пашне. А в последние два десятилетия поверхностный сток не формировался совсем как на рыхлой, так и на уплотненной пашне. Это связано с тем, что почва в этот период ко времени весеннего снеготаяния была талая или промерзала на небольшую глубину (до 50 см).

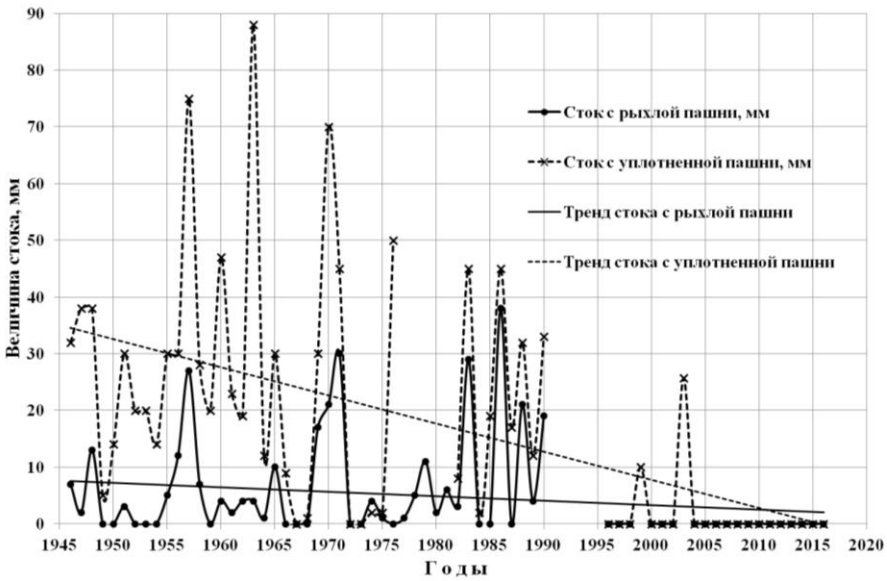


Рис. 3.16. Динамика поверхностного стока талых вод на каштановых и темно-каштановых почвах Волгоградской обл.

На основе этих данных построили теоретические кривые вероятности превышения стока с рыхлой и уплотненной пашни, которые хорошо аппроксимируют эмпирические точки исследуемых рядов наблюдений (рис. 3.17), и вычислили показатели стока разной вероятности превышения. Кривые вероятности превышения стока показывают, что на рыхлой пашне он формируется только 5 лет в десятилетие, а на уплотненной – 8 лет.

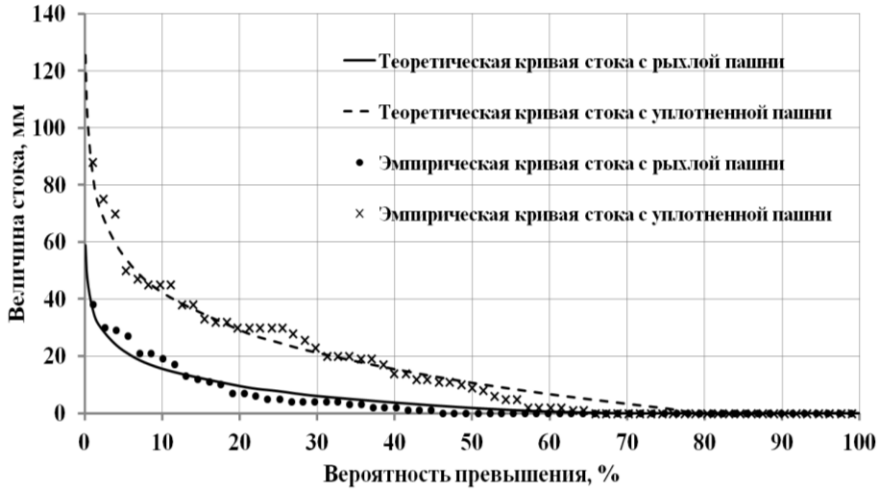


Рис. 3.17. Кривые вероятности превышения поверхностного стока талых вод с рыхлой и уплотненной пашни на каштановых и темно-каштановых почвах Волгоградской обл.

Нижнее Поволжье, Волгоградская обл., полупустыня, светло-каштановые почвы. Здесь были обобщены материалы наших исследований по формированию поверхностного стока с рыхлой (отвальная зябь) и уплотненной (многолетние травы, озимые, стерня и др.) пашни и по полученным результатам построены теоретические кривые вероятности превышения. В результате имеющиеся до сих пор ряды наблюдений удлинены до 50-66 лет. Эти данные позволяют более точно подойти к оценке поверхностного стока талых вод и роли хозяйственной деятельности в его формировании. Материалы этих обобщений приведены в табл. 3.25.

Таблица 3.25

Средние показатели снегозапасов и поверхностного стока талых вод на светло-каштановой почве Волгоградской обл.

Год	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока	Сток, мм	Запасы снеговой воды, мм	Коэффициент стока
	рыхлая пашня			уплотненная пашня		
1	3	2	4	6	5	7
1950	0	35	0	12	45	0,27
1951	22	31	0,70	-	-	-
1952	4	101	0,04	-	-	-
1953	0	28	0	-	-	-
1954	0	55	0	-	-	-
1955	0	22	0	-	-	-
1956	26	55	0,47	-	-	-
1957	4	26	0,15	25	40	0,63
1958	8	47	0,16	25	40	0,63
1959	0	93	0	51	92	0,55
1960	0	16	0	10	16	0,62
1961	0	21	0	13	18	0,73

Продолжение табл. 3.25

1	3	2	4	6	5	7
1962	1	74	0,02	34	77	0,44
1963	36	92	0,39	76	137	0,55
1964	2	61	0,03	27	74	0,36
1965	4	31	0,14	25	41	0,61
1966	0	15	0	7	15	0,47
1967	0	143	0	0	189	0
1968	16	44	0,36	30	150	0,20
1969	0	11	0	3	17	0,18
1970	7	129	0,05	36	136	0,26
1971	1	75	0,01	33	85	0,39
1972	0	22	0	0	23	0
1973	0	89	0	2	96	0,02
1974	0	41	0	5	49	0,10
1975	1	20	0,05	7	27	0,26
1976	0	26	0	7	36	0,19
1977	5	54	0,09	43	124	0,35
1978	13	17	0,76	35	73	0,48
1979	45	147	0,31	58	164	0,35
1980	0	41	0	10	63	0,16
1981	0	0	0	0	0	0
1982	0	17	0	-	-	-
1983	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	0	0	0	0
1985	0	39	0	-	-	-
1986	6	30	0,20	7	32	0,22
1987	0	99	0	0	98	0
1988	5	44	0,11	21	27	0,84
1989	3	25	0,12	39	45	0,87
1990	0	38	0	5	47	0,11
1991	0	22	0	0	17	0
1992	0	39	0	0	42	0
1993	0	17	0	0	14	0
1994	13	55	0,23	58	64	0,90
1995	0	52	0	0	58	0
1996	0	79	0	0	70	0
1997	0	60	0	0	60	0
1998	0	10	0	0	37	0
1999	-	-	-	10	27	0,37
2000	0	21	0	0	24	0
2001	0	14	0	-	-	-

Окончание табл. 3.25

1	3	2	4	6	5	7
2002	0	219	0	-	-	-
2003	3	50	0,06	11	35	0,31
2004	1	26	0,04	12	32	0,37
2005	0	18	0	0	19	0
2006	0	78	0	-	-	-
2007	0	5	0	-	-	-
2008	0	31	0	-	-	-
2009	0	44	0	0	31	0
2010	0	89	0	2	58	0,03
2011	0	15	0	-	-	-
2012	0	70	0	-	-	-
2013	0	41	0	-	-	-
2014	0	88	0	-	-	-
2015	0	43	0	0	78	0
2016	0	8	0	0	10	0
Среднее	3	47	0,06	15	55	0,27

Примечание. При обобщении были использованы материалы Г. П. Сурмача, А. Т. Барабанова, В. П. Борца, И. Г. Зыкова, Ю. В. Бондаренко, В. М. Ивонина.

Анализ этих материалов показывает, что величины поверхностного стока талых вод и других элементов водного баланса на светло-каштановой почве Волгоградской обл. значительно меньше, чем на обыкновенных черноземах Самарской обл. и тем более на серых лесных почвах Орловской обл. Они варьируют от очень маловодных (величина стока от 0-4 мм) до величин средней водности (сток 36-45 мм). Приведенные материалы дают представление о гидрологической роли рыхлой пашни в сравнении с уплотненной. В среднем за 65 лет слой стока с зяби составил всего 3 мм, в то время как на угодьях с уплотненной почвой сток был в 5 раз больше (15 мм). Коэффициент стока на рыхлой пашне составил 0,08, а снегозапасы 36 мм, на уплотненной пашне эти показатели были соответственно 0,26; 57 мм. На рыхлой пашне из 66 лет стока не было 44 года, очень слабый сток был 15 лет, слабый – 4 года, умеренный – 2 года, сильный 11 лет и очень сильный 7 лет, а на уплотненной пашне за 50 лет поверхностного стока не было 21 год, очень слабый сток был 9 лет, слабый – 4 года, умеренный – 11 лет, сильный – 4 года, и очень сильный – 1 год. Ход динамики величин стока на

светло-каштановой почве в исследуемый период представлен на рис. 3.18. Он также показывает, что величины стока как на рыхлой, так и на уплотненной пашне колеблются в значительной степени, и отмечается так же, как и в Среднем Поволжье, ЦЧО и в ЦРНЗ резкое снижение его в последние два десятилетия. Это связано с тем, что почва перед весенним снеготаянием почти все эти годы в лесостепной, степной и полупустынной зонах Русской равнины была талая или промерзала на небольшую (до 50 см) глубину.

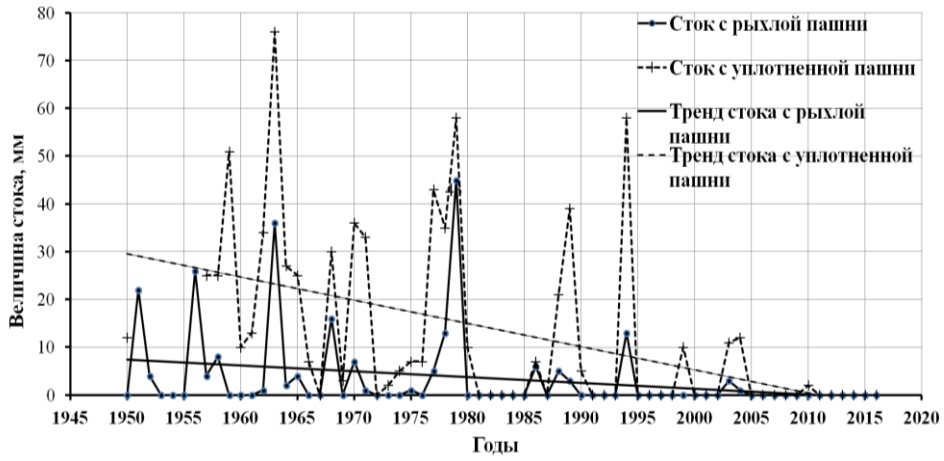


Рис. 3.18. Динамика поверхностного стока талых вод на светло-каштановых почвах Волгоградской обл.

Полученные материалы многолетних наблюдений позволили построить теоретические кривые вероятности превышения стока талых вод на рыхлой и уплотненной пашне (рис. 3.19), которые хорошо аппроксимируют эмпирические точки исследуемых рядов наблюдений, вычислить показатели стока разной вероятности превышения и стокорегулирующий эффект зяби. Они показывают, что на отвальной зяби поверхностный сток формируется 2-3 года в десятилетие, а на уплотненной пашне – 6-8 лет из 10 и величина его значительно больше (см. табл. 3.25).

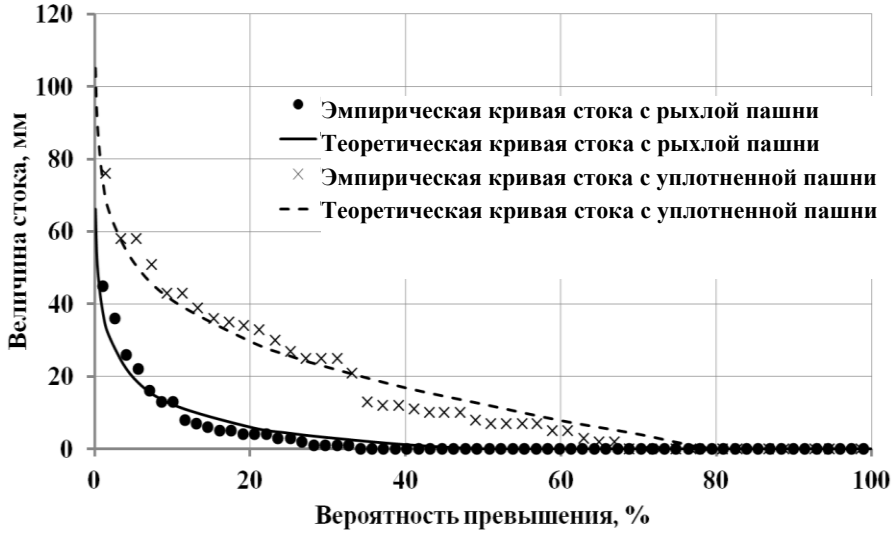


Рис. 3.19. Кривые вероятности превышения поверхностного стока талых вод с рыхлой и уплотненной пашни на светло-каштановых почвах Волгоградской обл.

Показатели поверхностного стока талых вод с уплотненной и рыхлой пашни разной вероятности превышения по природным зонам приведены в табл. 3.26. Анализ их показал, что 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.

Таблица 3.26

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

Зона, область, почва	Пашня	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:	1	37	169	115	91	28	12	4	0	1,07	1,45
темно-серая лесная	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
Степная, Волгоградская:	1	17	84	55	42	11	5	2	0	1,24	1,72
темно-каштановая	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.

Анализ этих данных показал, что средние величины стока с уплотненной пашни при движении от серых лесных почв (лесостепь) к светло-каштановым (полупустыня) снижаются с 30 до 15 мм. На рыхлой пашне темпы снижения значительно ниже.

3.4.3. Оценка влияния характера использования пашни на формирование стока талых вод

Общий характер кривых вероятности превышения стока (см. рис. 3.9, 3.11, 3.13, 3.15, 3.17, 3.19) выявляет закономерное увеличение разности в слое стока на рыхлой и уплотненной пашне при уменьшении значений вероятности превышения. При движении от лесостепи к степи и полупустыне эта разница увеличивается, т. е. она в значительной степени изменяется в зависимости от водности года: в маловодные годы – небольшая, а в многоводные – очень большая. Это связано с тем, что в годы, когда создаются условия для формирования значительного стока, впитывающая способность почвы снижается в большей степени на уплотненной пашне, чем на рыхлой, т. е. при отвальной обработке даже при самых неблагоприятных погодных условиях инфильтрационная способность почвы полностью не исчерпывается. Неровности на зяби, формирующиеся при обработке почвы, период снеготаяния обусловливают более раннее появление проталин и тем самым способствуют потере части стока на впитывание. На уплотненной же пашне, особенно при формировании ледяной корки, водопроницаемость мерзлой почвы в отдельные годы приближается к нулю. Количественно стокорегулирующий эффект зяблевой обработки выражается показателями, приведенными в табл. 3.27. Он зависит от водности года – увеличи-

Таблица 3.27

Показатели стокорегулирующей роли зяби в годы разной водности

Область, почва	Вероятность превышения стока, %						
	1	5	10	50	70	80	90
Орловская, серая лесная	27/1,21	20/1,25	19/1,32	8/1,73	5/0	0/0	0/0
Курская: темно-серая лесная	51/1,43	41/1,55	36/1,65	17/2,54	10/6	4/0	0/0
выщелоченный чернозем	94/1,96	62/2,02	49/2,11	14/3,33	2/0	0/0	0/0
Воронежская, обыкновенный чернозем	69/1,78	49/1,92	40/2,05	16/6,33	5/0	0/0	0/0
Самарская, обыкновенный чернозем	70/2,30	58/2,76	51/3,12	27/10	16/0	9/0	0/0
Волгоградская: каштановая	47/2,27	34/2,62	27/2,8	9/5,5	5/0	2/0	0/0
светло-каштановая	37/1,97	32/2,6	29/3,42	12/0	4/0	0/0	0/0

Числитель – разница в стоке с уплотненной и рыхлой пашни, знаменатель – соотношение стока с уплотненной и рыхлой пашни.

вается с уменьшением вероятности превышения стока, т. е. от маловодных к многоводным веснам, и при движении с юга на север. Коэффициенты снижения стока с рыхлой пашни по сравнению с уплотненной уменьшаются с уменьшением водности. В зональном плане они мало изменяются.

Если судить о стокорегулирующем эффекте по относительным показателям (коэффициентам), то он увеличивается от многоводных к маловодным вёснам, т. е. при небольших абсолютных величинах стока (в маловодные годы) относительная разница значительная, а при больших – наоборот. Поэтому только по относительным коэффициентам нельзя давать оценку стокорегулирующей роли зяби. Кривые, характеризующие связь стока с рыхлой и уплотненной пашни близки к прямой линии (рис. 3.20) и по всем исследуемым пунктам идут примерно параллельно.

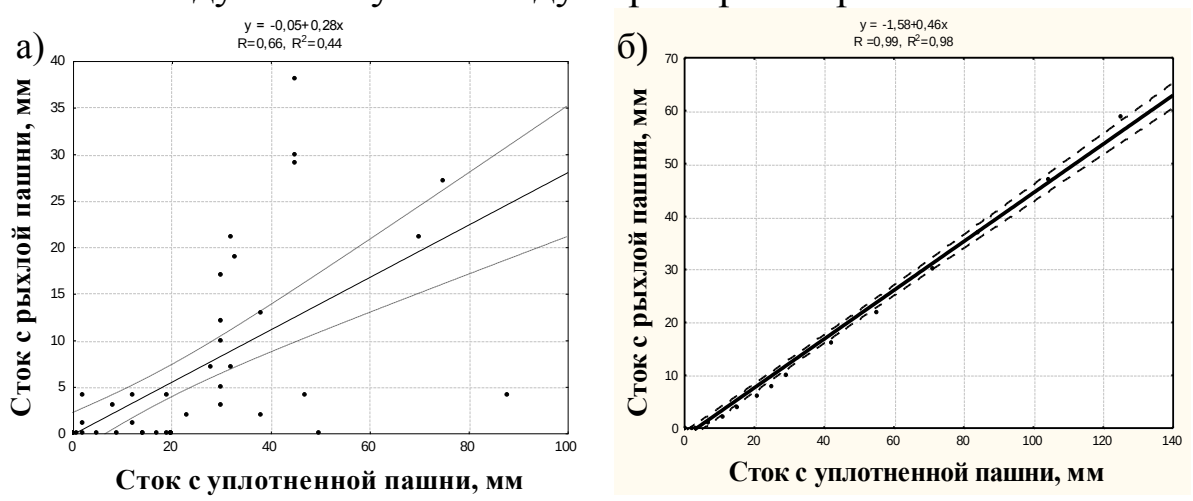


Рис. 3.20. Графики связи стока с рыхлой и уплотненной пашни, построенные по экспериментальным данным (а) и равнообеспеченным показателям (б)

Эти кривые аппроксимируются уравнением

$$y = a + вx, \qquad (53)$$

где x – сток с рыхлой пашни, мм; y – сток с уплотненной пашни, мм. Показатели коэффициента $в$ для всех кривых очень близкие (табл. 3.28). Это указывает на одинаковый, интразональный характер связи для всех рассматриваемых районов. Отличаются уравнения только величиной свободного члена, который равен максимальной величине стока с уплотненной пашни в год, когда отсутствует сток с рыхлой пашни. Отсюда можно предположить, что допустима экстраполяция этой закономерности за пределы рассматриваемых районов, по крайней мере на ближайшие области. Корреляционный анализ материалов выявил весьма высокую тесноту

связи – коэффициент корреляции по всем пунктам близок к 1. Относительные ошибки расчетных показателей стока, по сравнению с экспериментальными данными, в области значений стока с рыхлой пашни свыше 1 мм колеблются всего от –5 % до +6 %, в области очень малых значений (< 1 мм) ошибка достигает 14 %.

Таблица 3.28

Параметры уравнения (53) связи стока с уплотненной и рыхлой пашни, полученные по экспериментальным и равнообеспеченным показателям стока

Зона, область, почва	Экспериментальные			Равнообеспеченные		
	а	*в*	коэф. корреляции	*а*	*в*	коэф. корреляции
Лесостепь, Орловская, серая лесная	18	1,1	0,93	3	1,2	0,99
Лесостепь, Курская: темно-серая лесная	26	1,0	0,81	3	1,4	0,99
выщелоченный чернозем	25	1,4	0,74	19	1,6	0,98
Степь, Воронежская, обыкновенный чернозем	36	0,8	0,63	18	1,5	0,99
Степь, Самарская, обыкновенный чернозем	31	1,8	0,79	24	2,1	0,98
Степь, Волгоградская, каштановая	17	1,2	0,59	10	1,8	0,98
Полупустыня, Волгоградская, светло-каштановая	13	1,4	0,72	7	1,8	0,99

По приведенному уравнению связи (53) можно рассчитывать сток разной вероятности превышения по одному из видов пашни, имея данные по другому виду. Величины стока за любой конкретный год можно рассчитывать по этому же уравнению, используя его параметры (см. табл. 3.28). Показатели коэффициента *в* также мало отличаются по зонам, т. е. они интразональные. Хотя коэффициент корреляции варьирует в значительной степени (0,59-0,93), по этому уравнению можно довольно точно считать сток талых вод.

3.4.4. Влияние стокорегулирующих лесополос на природные факторы формирования поверхностного стока талых вод

Лесомелиоративные мероприятия, являясь важнейшим антропогенным фактором адаптивно-ландшафтной системы земле-

делия, играют многофункциональную роль. Им придается особое значение и оценить его можно только во взаимосвязи с другими элементами. По своему назначению и мелиоративному воздействию лесные полосы подразделяются на полезащитные, стокорегулирующие, прибалочные и приовражные. Воздействуя на природные факторы (снегозапасы, влажность и промерзание почвы, температура воздуха и почвы и др.), они влияют на засухи и суховеи, эрозионно-гидрологические процессы и урожайность сельскохозяйственных культур. Согласно *закону лимитирующих факторов стока* важнейшими природными факторами, влияющими на эрозионно-гидрологические процессы, являются только снегозапасы, увлажнение и промерзание почвы. Известно, что лесные полосы оказывают мощное воздействие на эти природные факторы. Рассмотрим их влияние.

Закономерность снегоотложения и снеготаяния на склонах разных экспозиций в связи с характером ветрового режима следующая. На снегозаносимых склонах мощность снежного покрова сверху вниз увеличивается, а на снегосдуваемых уменьшается. Это обусловливает разный характер стаивания снега и обнажения почвы. На снегосдуваемых склонах раньше обнажается от снега почва на нижних участках, т. е. идет постепенное стаивание снега снизу вверх. При этом поступающая сверху на нижележащие участки склонов вода вызывает интенсивный смыв почвы. На снегозаносимых склонах, наоборот, почва освобождается от снега сверху вниз, а стекающая вода поступает в снег и эрозия протекает менее интенсивно. Поэтому снегоотложение необходимо регулировать так, чтобы мощность снежного покрова увеличивалась сверху вниз по склону. Для этого можно использовать разные способы: лесные полосы, кулисы из сельскохозяйственных растений, снегозадержание путем распашки и уплотнения снега и др.

Лесные полосы как постоянно действующий фактор оказывают мощное влияние на накопление снега и характер снегоотложения. Причем влияние это зависит от ветрового режима, способа их размещения, конструкции, параметров (количество рядов, ширина и др.), расстояния между ними. Как в зональном плане, так и на разных элементах рельефа и при различной ориентации к странам света это воздействие бывает разным в лесных полосах плотной конструкции и в коротких снежных шлейфах накапливается много снега, в ажурных полосах снега собирается меньше и снеж-

ные шлейфы длиннее, а продуваемые полосы наиболее равномерно распределяют снег на полях. Причем в самих лесополосах его иногда может быть меньше, чем в поле. С точки зрения жизнеобеспечения лесных полос и влияния их на эрозионно-гидрологический процесс они сильно отличаются друг от друга. Лесополосы плотной конструкции, собирая в себе и в коротких шлейфах много снега, могут полностью предохранять почву от промерзания или резко уменьшать его глубину, что часто обусловливает полное или почти полное водопоглощение на этих участках и обеспечение деревьев влагой. На снегонакопление в поле они мало воздействуют. Необходимо решение задачи борьбы с эрозией почв в межполосном пространстве. Полосы продуваемой конструкции, несмотря на общее увеличение снегозапасов, мало влияют на глубину промерзания почвы, что снижает их стокорегулирующие возможности, а повышенные снегозапасы могут приводить к увеличению стока и эрозии. Лесополосы ажурной конструкции занимают промежуточное положение по воздействию на указанные показатели.

Это общая схема влияния лесополос на снегонакопление и снегоотложение. В зональном плане в зависимости от рельефа, ветрового режима, конструктивных особенностей лесополос и других факторов она может меняться. В европейской части РФ, где не выражено или слабо выражено господствующее направление метельных ветров, снегоотложение под влиянием лесополос происходит в основном по описанной выше схеме без особой дифференциации по экспозициям склонов.

Таким образом, оценивая в целом снегоотложение на склонах, следует отметить, что на него влияет много факторов. На склонах без лесомелиорации оно в значительной степени зависит от характера ветрового режима и экспозиции склонов. Наиболее мощным антропогенным фактором являются стокорегулирующие лесные полосы. Они способствуют перераспределению снега на водосборе, накоплению и сохранению большого количества его на полях.

Влияние лесных полос на снегозапасы и снегоотложение важно знать и учитывать не только как фактор, влияющий непосредственно на сток и эрозию почв, но и на увлажнение и промерзание почвы, которые в свою очередь являются также факторами эрозионно-гидрологического процесса. Специфический характер снегоотложения под воздействием лесных полос обусловливает и соответствующий характер увлажнения и промерзания почвы как в са-

мих лесополосах, так и на полях, т. е. эти природные факторы влияют на эрозионно-гидрологические процессы во взаимодействии как между собой, так и с антропогенными (лесные полосы).

Вопрос о влиянии лесных полос на влажность почвы изучался многими исследователями. Все они в основном рассматривали его с позиций увлажнения почвы полей и лесов и совершенно недостаточно внимания уделяли влажности как фактору стока и эрозии. Для этого важно знать характер увлажнения почвы перед уходом ее в зиму. Анализ литературных данных и наши наблюдения показывают, что в абсолютном большинстве случаев лесные полосы способствуют увеличению влажности почв весной. Неравномерное снегоотложение приводит к неоднородному увлажнению ее. В лесополосах и шлейфовых частях межполосных пространств почва увлажняется сильнее, чем в межшлейфовых частях и в открытом поле.

Однако в результате более интенсивного расходования влаги в течение лета деревьями и сельскохозяйственными растениями осенью запасы воды в почве в лесополосах, шлейфовых зонах и в открытых полях выравниваются, а в лесополосах они даже иногда бывают ниже. То есть почва в зиму уходит по уровню увлажнения примерно в одинаковом состоянии как в лесных полосах, так и на прилегающих к ним участках и в открытых полях.

Таким образом, лесные полосы как антропогенный фактор слабо воздействуют на природный фактор стока – увлажнение почвы в предзимний период – и не оказывают через него существенного влияния на сток талых вод или способствуют некоторому его уменьшению.

Очень важным природным фактором стока, на который большое влияние оказывают лесные полосы, является глубина промерзания почвы. Известно, что талая или промерзшая на небольшую глубину (до 50 см) почва сохраняет высокую способность впитывать снеговую воду и стока не бывает независимо от уровня увлажнения почвы и снегозапасов. При более глубоком промерзании формируется сток в зависимости от уровня увлажнения почвы и снегозапасов. В этом случае глубина промерзания не играет роли. Снег, обладая хорошими теплоизоляционными свойствами, предохраняет почву от промерзания. Лесные полосы, являясь мощным фактором снегоотложения, в значительной степени воздействуют на характер промерзания почвы.

Особенности снегоотложения по природным зонам откладывают отпечаток и на характер влияния лесных полос на глубину промерзания почвы, которое в значительной степени зависит от сроков установления устойчивого снежного покрова и морозов. Для предохранения почвы от замерзания достаточно того, чтобы мощность снега была 20-30 см к началу установления морозов и в дальнейшем увеличивалась до 50-80 см по мере усиления их. Такое количество снега часто накапливается в лесных полосах и вблизи от них при первых же метелях. С полей без лесных полос он, как правило, уносится и почва остается незащищенной.

Обобщение и анализ многолетних данных по глубине промерзания почвы в лесных полосах, под их защитой и в открытом поле позволили выявить ряд интересных фактов и зависимостей. Почва предохраняется от замерзания или глубина промерзания ее бывает небольшой в лесополосах и под снежными шлейфами. В межшлейфовых частях межполосного пространства и в открытом поле она промерзает глубоко и примерно одинаково.

В лесостепи европейской части Российской Федерации, где ветровой режим относительно однородный, средняя глубина промерзания почв в лесополосах составляет 33 см, а в открытом поле 72 см. Глубина промерзания меньше 50 см бывает в открытом поле в годы с 25 %-ной вероятностью превышения (4 года в десятилетие), а в лесополосах – 65 %-ной (6-7 лет в десятилетие). В Нижнем Поволжье роль лесных полос в предохранении почвы от промерзания значительно выше. На каштановых почвах (в районе Камышина) средняя глубина промерзания почвы в открытом поле – 59 см, в лесополосах 26, на светло-каштановых почвах эти показатели соответственно составляют 70 и 20 см. Совсем почва не замерзает в лесополосах – 3-4 года в десятилетие, а в открытом поле на каштановой почве – 1 раз в десятилетие, на светло-каштановой – 1 раз в 20 лет. Промерзание почвы до 50 см в лесополосах бывает в годы с 90-97 %-ной вероятностью превышения, т. е. почти ежегодно она бывает талой или промерзает на небольшую глубину. В открытом поле в таком состоянии почва бывает в годы с 40-50 %-ной вероятностью превышения, т. е. 4-5 лет в десятилетие.

Большие различия во влиянии лесополос на предохранение почвы от глубокого промерзания связаны с сочетанием сроков установления снежного покрова и морозов, а также с гидрометеорологическими условиями зимнего периода.

Оценивая в целом влияние лесных полос на глубину промерзания почвы, следует сказать, что с помощью лесополос можно в значительной степени регулировать ее. Лесополосы во всех зонах способствуют уменьшению глубины промерзания. В условиях, когда снег распределяется равномерно в системе лесополос, влияние их на глубину промерзания снижается. В европейской части РФ влияние лесных полос на уменьшение глубины промерзания при движении на юг и юго-восток увеличивается.

Резюмируем изложенное о влиянии контурных стокорегулирующих лесополос на природные факторы стока – снегозапасы, увлажнение почвы и глубину ее промерзания. Лесополосы, оказывая мощное воздействие на снегоотложение, способствуют накоплению большего количества снега и при равномерном его распределении могут обусловливать повышение стока талых вод. При неравномерном распределении снега, когда образуются снежные сугробы, которые предохраняют почву от глубокого промерзания, и водопоглощение сохраняется на высоком уровне, лесополосы способствуют сокращению стока талых вод. Лесные полосы мало влияют на предзимнее увлажнение почвы, а в связи с этим и на сток. В ряде случаев, когда в лесополосах почва бывает суше, чем в открытом поле, они могут способствовать некоторому его снижению.

Таким образом, зная роль природных факторов в формировании стока и влияние на них лесных полос, можно управлять ими. В связи с тем, что стокорегулирующие лесные полосы наиболее мощно воздействуют на природные факторы эрозионно-гидрологического процесса через снегораспределительные функции, их необходимо и регулировать в первую очередь на основе знания закономерностей снегоотложения.

Стокорегулирующие лесные полосы, оказывая мощное воздействие на природные факторы (снегоотложение, увлажнение почвы, глубина и характер ее промерзания), в сильной степени влияют на водопоглощение и сток талых вод. Закономерности влияния природных факторов на сток талых вод и взаимодействие антропогенных и природных факторов рассмотрены в работах автора [38, 63, 118]. Здесь же мы дадим оценку стокорегулирующей эффективности лесных полос как одного из элементов почвозащитной системы земледелия, чтобы определить роль и место в ней лесомелиорации.

Таким образом, стокорегулирующая роль противоэрозион-

ных лесных полос выше, чем агротехнических мероприятий, однако она недостаточна для эффективной защиты почв от эрозии. Поэтому необходимо применять их в сочетании с другими элементами системы земледелия.

3.4.5. Влияние агротехнических противоэрозионных мероприятий на формирование поверхностного стока талых вод

Данные о роли агротехнических противоэрозионных мероприятий в формировании стока талых вод, смыва почвы и урожая сельхозкультур были обобщены и глубоко проанализированы, дана характеристика каждому приему [63]. Здесь же мы дадим общую оценку агротехническим противоэрозионным мероприятиям с учетом полученных данных за последний 24-летний период.

Агротехнические противоэрозионные приемы относятся к группе приемов, влияющих на водопоглощение и сток рассредоточенно по всей территории. Их действие направлено на задержание осадков на месте их выпадения и защиту почв от эрозии на всей территории. Их, в свою очередь, по характеру воздействия и назначению можно разделить на 4 основные группы. В 1-ю входят приемы, направленные на радикальное улучшение водно-физических свойств почв и, главным образом, на повышение водопроницаемости: углубление пахотного слоя (глубокая вспашка и безотвальное рыхление), окультуривание, искусственное оструктуривание почвы, щелевание, кротование и др. Ко 2-й группе относятся приемы, направленные на поверхностное водозадержание: поперечная и контурная вспашка зяби, создание искусственного микрорельефа (лункование, прерывистое бороздование, обвалование, микролиманы и др.). В 3-ю входят приемы, обеспечивающие высокую противоэрозионную устойчивость почвы: поверхностные обработки, плоскорезная обработка, мульчирование поверхности почвы и др. В 4-ю группу можно отнести приемы, направленные на регулирование снегоотложения и снеготаяния: снегозадержание (снегопах, кулисы, лесополосы и др.), полосное зачернение, уплотнение, распашка снега с целью регулирования снеготаяния.

В литературе очень часто ошибочно отводится большая роль в регулировании стока агротехническим мероприятиям. Наши исследования и обобщение имеющихся данных позволили дать количественную оценку их стокорегулирующей и противоэрозионной эффективности (табл. 3.29).

Таблица 3.29

Эффективность агротехнических противоэрозионных приемов

Прием	Кол-во годо-опытов	Уменьшение (–) или увеличение (+) в сравнении с контролем		
		сток, мм	смыв, т/га	урожай, ц/га
Глубокая зяблевая вспашка	22	–6	–0,9	+1,2
Щелевание зяби	6	–3	–0,3	–0,1
Вспашка поперек склона или по контуру	14	–2	–0,4	+0,8
Обвалование зяби	39	–5	–0,2	+1,1
Ступенчатая вспашка	14	–1	–1,1	+1,2
Комбинированная вспашка	25	+2	0	+0,1
Прерывистое бороздование	48	–2	+0,2	+0,9
Лункование зяби	62	+1	+0,1	+0,7
Устройство микролиманов	17	–2	+0,1	+1,8
Плоскорезная обработка	75	+2	–0,1	–0,4
Мульчирование зяби соломой	4	–6	-0,8	+5,3
Полосное зачернение снега	5	–5	+1,4	+1,0
Полосное укрытие снега соломой	4	–4	+0,3	+1,3

Глубокая зяблевая вспашка на светло-каштановых почвах способствует сокращению стока в среднем на 5 мм и смыва на 0,9 м^3/га, на обыкновенных черноземах сток снижается на 6 мм, смыв на 0,4 м^3/га, на черноземах ЦЧО и Нечерноземья снижение стока и смыва соответственно составляет 8 мм и 1,66 м^3/га, а на серых лесных почвах сток уменьшался на 12 мм. Эти данные могут служить нормативной базой при построении комплекса противоэрозионных мероприятий на расчетной основе.

Стокорегулирующая эффективность поперечной пахоты низкая. Г. П. Сурмач [5] обобщил 62 годоопыта и проанализировал большой литературный материал и результаты собственных исследований о гидрологической роли поперечной зяблевой вспашки по зонам европейской части страны от подзолистых до светло-каштановых почв. Он пришел к выводу, что на вариантах с поперечной вспашкой по сравнению с продольной сток в большинстве случаев сокращался на величину до 5-6 мм, а в ряде случаев он был одинаковый или даже выше. Учитывая это обобщение, а также последующие наши и результаты других исследований, можно сделать вывод о том, что в среднем стокорегулирую-

щий эффект поперечной пахоты не превышает 2-3 мм. Так же низка стокорегулирующая роль контурной обработки. Это связано с тем, что гребни поперечной и контурной пахоты не представляют собой сплошных преград, они имеют частые разрывы, понижения, через которые свободно стекает талая вода. Те небольшие бороздки, которые имеются на пашне, перепружены комочками земли, поэтому вода течет не вдоль них, а вниз по склону через понижения в гребнях. Емкость микрорельефа на зяби, вспаханной вдоль и поперек склона, мало различается. Наши измерения показали, что она составляла при продольной вспашке 15,8, а при поперечной 17,4 мм.

Искусственный микрорельеф на зяби также малоэффективен. Нами совместно с Г. П. Сурмачем и Е. А. Гаршинёвым [34, 46, 119, 120] обобщены имеющиеся данные, которые свидетельствуют о том, что стокорегулирующая и противоэрозионная эффективность его низкая. Из 215 годоопытов (случаев) положительный стокорегулирующий эффект от применения искусственного микрорельефа наблюдается в 39 % случаев, отрицательный – 31 и нулевой 30 %. В 64 % случаев эффект был всего ±5 мм, что находится в пределах точности опыта. Средние же величины эффекта колеблются около нуля. В прямой зависимости от стокорегулирующей находится и его противоэрозионная эффективность. Средняя величина сокращения смыва на серых лесных почвах при применении обвалования 0,7 т/га, а на лункованной зяби смыв увеличился в среднем на 0,2 т/га.

Причина низкой его эффективности в следующем. Величина стокорегулирующего эффекта искусственного микрорельефа на зяби обусловливается емкостью микрорельефа, впитывающей способностью почвы и разницей между снегозапасами на контрольном варианте и варианте с микрорельефом (снегозадерживающий эффект). Емкость микрорельефа является величиной постоянной. Она зависит от вида орудия, применяемого для устройства микрорельефа и составляет 30-40 мм. Разница в снегозапасах на контроле и на варианте с микрорельефом также величина постоянная, она связана с емкостью микрорельефа и составляет 10-15 мм. Эта величина отрицательная и чем больше абсолютное значение ее, тем меньше стокорегулирующий эффект. Важнейшим показателем, который обусловливает стокорегулирующий эффект и который, как правило, не учитывается, является впиты-

вающая способность почвы. Эффект от микрорельефа мог бы быть равным или больше величины его емкости, если бы впитывающая способность почвы на опытном варианте была бы равна или больше, чем на контроле, а снегозапасы на обоих вариантах одинаковые, т. е. мы достигли бы ожидаемого эффекта.

Однако, во-первых, микрорельеф играет снегозадерживающую роль, что приводит к снижению эффекта, а во-вторых, как показывают исследования [63], при устройстве микрорельефа снижается водопроницаемость почвы. Причины снижения водопроницаемости следующие: уплотнение почвы гусеницами трактора и колесами орудий при поделке микрорельефа после вспашки и рабочими органами орудий при его устройстве в самих емкостях микрорельефа; уменьшение мощности рыхлого слоя в днище емкости, что равносильно уменьшению глубины вспашки, а это, как известно, приводит к уменьшению впитывающей способности почвы; образование наилка и закупорка пор в связи с формированием микростока и смыва с бортов емкостей во время осенних дождей; переувлажнение почвы в днищах емкостей с осени и последующая закупорка пор льдом зимой; образование льда в емкостях микрорельефа.

Таким образом, созданные искусственные емкости микрорельефа не компенсируют потери на впитывании и сток не сокращается. Стокорегулирующий эффект искусственного микрорельефа будет зависеть при прочих равных условиях от степени снижения впитывающей способности почвы при его устройстве.

Рассмотрим возможные случаи изменения стокорегулирующего эффекта при изменении водопроницаемости почвы. Если величина водопоглощения на варианте с микрорельефом $W_м$ в сумме с величиной слоя водозадержания V и разницей в снегозапасах на контроле и опытном варианте $_{\Delta}O$ будут больше величины водопоглощения на контроле $W_к$ ($W_м + V + {}_{\Delta}O > W_к$), то стокорегулирующий эффект Э будет больше нуля, т. е. положительный (табл. 3.30).

Если впитывающая способность почвы на варианте с микрорельефом уменьшается до такой величины, что она в сумме с объемом водозадержания и разницей в снегозапасах будет равна впитывающей способности почвы на контроле ($W_м + V + {}_{\Delta}O = W_к$), то эффект будет равен нулю, т. е. объем емкости микрорельефа компенсирует потери на впитывании. И если впитывающая способность почвы в результате устройства микрорельефа уменьшится

до такой степени, что в сумме с указанными выше показателями она будет меньше впитывающей способности почвы на контроле ($W_м + V + {}_\Delta O < W_к$), то эффект будет отрицательный, т. е. объем емкостей микрорельефа не компенсирует потери на впитывании.

Таблица 3.30

Показатели стокорегулирующего эффекта при разных величинах впитывающей способности почвы на варианте с микрорельефом

Показатель	$W_м + V + {}_\Delta O > W_к$		$W_м + V + {}_\Delta O = W_к$	$W_м + V + {}_\Delta O < W_к$	
$W_м$	50	40	30	20	10
V	30	30	30	30	30
${}_\Delta O$	–10	–10	–10	–10	–10
$W_м + V + {}_\Delta O$	70	60	50	40	30
$W_к$	50	50	50	50	50
Э	+20	+10	0	–10	–20

Таким образом, несмотря на то, что мы создали емкости определенного объема, мы не достигли желаемого эффекта, так как в результате их создания уменьшили впитывающую способность почвы.

Проиллюстрируем сказанное примерами. Примем разницу в снегозапасах на контроле и на опытном варианте, равную –10 мм, слой водозадержания в емкости микрорельефа 30 мм, а суммарное водопоглощение на контроле 50 мм. Подставив в уравнение (см. табл. 3.30) эти величины, получим показатели стокорегулирующего эффекта при разных величинах впитывающей способности на варианте с микрорельефом.

При величине водопоглощения на варианте с микрорельефом, равной водопоглощению на контроле или близкой к ней (40-50 мм), стокорегулирующий эффект положительный. Снижение водопоглощения до 30 мм приводит эффект к нулю, а дальнейшее снижение его обусловливает отрицательный эффект.

Итак, если нам удастся добиться устройства микрорельефа без уменьшения впитывающей способности почвы, т. е. $W_м = W_к$, то эффективность микрорельефа будет равна объему водозадержания в емкостях минус снегозадерживающий эффект.

Таким образом, созданные искусственные емкости микрорельефа не компенсируют потери на впитывании и сток не сокращается. Кроме того, когда отдельные емкости переполняются и размываются, то создается "лавинный эффект" и размываются остальные.

Пути повышения стокорегулирующей эффективности могут

быть следующие: сохранение впитывающей способности почвы на уровне контроля и увеличение ее, создание емкостей маленьких по размеру, но с большим суммарным объемом водозадержания. Сохранения впитывающей способности почвы на вариантах с искусственным микрорельефом на уровне контроля или увеличения ее можно достигнуть мульчированием поверхности почвы, применением искусственных структурообразователей, совместным применением микрорельефа и лесных полос и др. Но эти меры сильно не повысят стокорегулирующую эффективность микрорельефа, так как он почти не влияет на природные факторы (глубина промерзания, влажность почвы, снегозапасы), обусловливающие формирование стока.

Щелевание уплотненной пашни по разным данным в основном способствовало небольшому сокращению стока и повышению продуктивности. В ряде случаев такого эффекта не было или было даже увеличение стока. Это связано с разнообразием условий проведения исследований, различием методов и др. Например, при небольшой глубине промерзания, когда почва на дне щелей бывает талая (глубина щелевания обычно не более 50 см), стокорегулирующий эффект щелевания бывает высоким. Щели, заполненные соломой или другим мульчматериалом, предохраняющим почву от замерзания, также работают высокоэффективно. Щели открытые осыпаются землей, обычно глубоко промерзают, после оттепелей заполняются льдом, становятся водонепроницаемыми и эффект от щелевания бывает отрицательный.

Из анализа всей совокупности литературных данных по эффективности щелевания почвы на уплотненной пашне видно, что применение этого приема с помощью существующих средств механизации малоэффективно. Величина задержания стока не превышает 5-7 мм. Противоэрозионная роль их тем более невысока, так как уплотненные агрофоны, особенно многолетние травы, обладают хорошими почвозащитными свойствами. Этот прием можно совершенствовать в направлении создания более глубоких (свыше глубины промерзания почвы) открытых или заполненных мульчматериалами щелей.

Плоскорезная обработка разрабатывалась как способ борьбы с дефляцией, но потом стала применяться и как средство для борьбы с водной эрозией. Оценивая в целом роль плоскорезной обработки почвы, следует сказать, что по всем зонам европей-

ской части РФ отмечается тенденция к повышению снегозапасов, стока талых вод и водопоглощения при плоскорезной обработке. Причем величина его небольшая. Сток увеличивается на 2-6 мм, снегозапасы на 4-15, а водопоглощение на 8-13 мм (в ряде случаев оно уменьшалось).

Противоэрозионная роль плоскорезной обработки высокая. Причем в зональном плане она увеличивается при движении с юга на север. В наших исследованиях смыв почвы почти во все годы при плоскорезной обработке отсутствовал. В многоводные годы снижение смыва достигало 6,7 $м^3$/га.

Мульчирование зяби соломой способствовало сохранению комочков почвы от разрушения и поддержанию верхнего слоя в более рыхлом состоянии. Это, в свою очередь, обеспечивало просачивание влаги во время зимних оттепелей из верхнего слоя в более глубокие и предотвращало поры от закупорки льдом. На контроле без мульчирования комочки почвы разрушались под действием осенних осадков, некапиллярные поры превращались в капиллярные, они закупоривались льдом и поверхность почвы становилась ровной и монолитной, а местами на ней образовывалась ледяная корка. Поэтому водопоглощение почвой под мульчей было несколько выше. Стокорегулирующая эффективность мульчирования зяби составила 5-7 мм. Мульчирования было недостаточно для длительного сохранения водопрочной структуры и значительного сокращения стока. Необходимо совершенствовать приемы повышения водопрочности структуры, возможно путем применения химических структурообразователей.

Приемы регулирования снеготаяния (полосное зачернение, уплотнение, валкование и мульчирование снега), которые рекомендовали и до сих пор еще рекомендуют без достаточного обоснования, также оказались малоэффективны и даже был отрицательный эффект. Например, полосное зачернение снега, ускоряя освобождение почвы от него, обусловило увеличение смыва почвы на открытых полосах в 2 раза.

Анализ и обобщение литературных данных и проведенные нами исследования показали, что имеющийся большой набор агротехнических средств не позволяет эффективно воздействовать на процесс водопоглощения почвой влаги зимних осадков. Агротехнические приемы, обладая таким важным положительным свойством, как воздействие на всю территорию, на которой они

применяются, малоэффективны в стокорегулирующем и противоэрозионном отношении. Приемы искусственного микрорельефа, щелевание, регулирование снеготаяния неэффективны, углубление пахотного слоя малоэффективно. Мульчирование поверхности почвы, оструктуривание и обогащение ее органическим веществом (окультуривание) способствуют повышению впитывающей способности и влагоемкости почвы. Однако в настоящее время и в ближайшей перспективе они не могут быть широко применимы из-за трудоемкости, отсутствия средств и недостатка материалов.

Агротехнические приемы в принципе не могут быть высокоэффективны, так как они почти не влияют на природные факторы стока – увлажнение и промерзание почвы, снегозапасы. Это укладывается в рамки важного теоретического положения о том, что почва как саморегулирующаяся система способна поглотить ограниченное количество воды, определяемое состоянием увлажнения почвы. Тот небольшой эффект от применения агротехнических мероприятий бывает не за счет повышения водопроницаемости, а за счет поверхностных емкостей и некапиллярных пор и полостей. Они, как правило, очень малы.

Низкая стокорегулирующая и противоэрозионная эффективность агротехнических приемов не должна являться причиной отказа от них. Однако правильная оценка стокорегулирующей роли агротехнических противоэрозионных мероприятий должна предостеречь от опасного заблуждения, что применяя их можно достичь высокого эффекта в регулировании стока и защите почв от эрозии. Переоценка их роли, имеющаяся в настоящее время в литературе, опасна, так как она создает иллюзию благополучия и снимает необходимость применения других противоэрозионных мероприятий и особенно лесомелиоративных, без которых невозможно создать надежную противоэрозионную защиту. Агротехнические приемы могут применяться в комплексе с другими противоэрозионными мероприятиями.

Перспективными противоэрозионными приемами могут быть приемы, направленные:

на воздействие на природные факторы стока – глубину промерзания, влажность почвы и снегозапасы;

регулирование поверхностного стока путем потускулярного перевода его в грунтовой (лесные полосы, водозадерживающие

валы и канавы) или безопасного сброса по поверхности (наклонные водоотводящие борозды, распылители стока, водоотводящие валы и др.);

повышение противоэрозионной устойчивости почв (минимализация обработки, плоскорезная обработка, использование многолетних трав для улучшения структуры почв и др.);

использование почвозащитных свойств растительности (почвозащитные севообороты, постоянное залужение сильноэродированных участков и водотоков, совершенствование структуры посевных площадей и др.).

3.4.6. Влияние лугомелиоративных мероприятий на эрозионно-гидрологические процессы

Естественная травянистая растительность обладает высокими почвозащитными свойствами. Однако в агроландшафтах сенокосы и пастбища из-за интенсивной хозяйственной нагрузки сильно деградированы и часто подвергаются эрозии, особенно на крутых присетевых и балочных склонах. Для повышения их почвозащитной эффективности и продуктивности назначаются приемы поверхностного и коренного улучшения с подсевом семян многолетних трав или полной заменой естественного травостоя сеяным, внесением удобрений, рационализацией приемов использования (сенокосо- и пастбищеобороты и т. п.).

На слабоизрезанных оврагами балочных склонах крутизной до 20° при угнетенном состоянии травостоя и при наличии не менее 25 % ценных трав проводят их поверхностное улучшение. Мероприятия включают подготовку площади (расчистка, удаление кочек, засыпка промоин и пр.), регулирование поверхностного стока, уход за дерниной и травостоем (боронование, уничтожение сорной растительности, подсев трав, снегозадержание и др.), лесомелиорацию [81].

На сильноэродированных склонах с деградированным травяным покровом и долей ценных трав менее 25 % проводят мероприятия по коренному улучшению: регулирование поверхностного стока, планирование поверхности с удалением дернины, посев травосмеси, внесение удобрений, лесомелиорацию.

3.4.7. Влияние гидротехнических противоэрозионных мероприятий на эрозионно-гидрологические процессы

К простейшим гидротехническим противоэрозионным мероприятиям на пашне относятся водоотводящие валы, канавы с валами, валы-террасы, водоотводящие борозды и др. Они применяются во взаимосвязи с другими противоэрозионными мероприятиями и особенно с лесомелиоративными. Гидротехнические мероприятия на пашне в нашей стране изучены мало и пока не находят широкого применения.

Водопоглощающие канавы с валами применяются для регулирования стока и борьбы с оврагами, обеспечивая регулирование стока талых вод 10 %-ной вероятности превышения.

Высокую стокорегулирующую и противоэрозионную роль играют водоотводящие (водонаправляющие) валы-ложбины в системе контурно-мелиоративного земледелия. Наиболее они эффективны в сочетании с дорожной, полезащитной и оросительной сетью. Они, отводя воду на безопасные участки, предотвращают смыв почвы, позволяют нарезать одинаковой ширины рабочие загоны и избежать крутых поворотов при их нарезке, создают возможность аккумулировать непоглотившиеся на пашне талые воды в склоновых лиманах и водохранилищах.

Валы-террасы на пашне играют очень большую стокорегулирующую, противоэрозионную и агрономическую роль. Они положительно влияют на снегоотложение, промерзание и влажность почвы, смыв почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Сток талых вод уменьшается на величину от 1-8 до 45-60 мм [13].

Наклонные водоотводящие борозды применяются для защиты почвы от смыва на нижележащих участках. Их устраивают по нижней границе или внутри полей через 50-100 м плугом с одним корпусом при уклоне по линии пахоты не более 1,0-1,5°.

Таким образом, гидротехнические приемы на пашне, направленные на поверхностное водозадержание и увеличение водопоглощения (валы-террасы, водопоглощающие канавы с валами), обеспечивают уменьшение стока на 30-50 мм и смыва почвы в 8-12 раз. Однако все эти приемы имеют относительно высокую стоимость, они рассчитаны на строго контурную организацию территории, что создает сложности в проведении работ и эксплуатации. Все это сдерживает их внедрение в практику.

Водоотводящие устройства (наклонные водоотводящие борозды и валы) обеспечивают снижение смыва в 2-8 раз или полное его предотвращение. Они дешевы, просты в создании и эксплуатации, поэтому их целесообразно применять в производстве.

3.5. Экспериментальная оценка новых приемов регулирования снегоотложения и поверхностного стока талых вод для управления эрозионно-гидрологическим процессом защитными лесными насаждениями

3.5.1. Система стокорегулирующих лесополос комбинированной конструкции

Знание закономерностей снегоотложения, водопоглощения, формирования стока, процессов эрозии и влияния на них стокорегулирующих лесных полос с учетом их снегораспределительных и стокорегулирующих функций позволили нам разработать новые приемы регулирования снегоотложения, поверхностного стока талых вод и управления эрозионно-гидрологическим процессом защитными лесными насаждениями.

Для регулирования поверхностного стока путем перераспределения снега необходимо выявить закономерности снегоотложения на склонах. Для этого необходимо определить главные факторы, влияющие на этот процесс, выявить долю каждого из них и дать им количественную оценку. Это, в свою очередь, позволяет определить, на какие природные и антропогенные факторы и чем нужно воздействовать, чтобы путем регулирования снегоотложения предотвратить глубокое промерзание почвы с целью управления эрозионно-гидрологическим процессом.

В накоплении и сбережении влаги, ее рациональном сохранении и использовании, переводе поверхностного стока во внутрипочвенный большую роль играют системы стокорегулирующих лесополос, которые в условиях пересеченного эрозионного рельефа на полевых землях (приводораздельные и присетевые земли) размещаются контурно (по горизонталям). Однако потенциал их еще полностью не реализован, в частности необходимо исследование конструктивных особенностей стокорегулирующих лесополос, поскольку они определяют не только эффективность влияния на прилегающие мелиорируемые земли, но и устойчи-

вость самих насаждений, их долговечность и способность адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды.

Многолетними исследованиями ВНИАЛМИ (сейчас ФНЦ агроэкологии РАН) и его опытной сети, других научных учреждений установлены 3 главные аэродинамические конструкции лесных полос: продуваемая, ажурная и плотная. Лесные полосы различной конструкции влияют на характер снегоотложения неодинаково. В плотных лесополосах (практически без просветов по всему профилю) и в их приопушечной части собираются большие снежные сугробы за счет снега, сдуваемого с межполосного пространства. Это обеспечивает предохранение почвы от промерзания, но талая вода теряется с полей, кроме того из-за продолжительного периода таяния сугробов в приопушечной части задерживается начало проведения весенних полевых работ.

Продуваемые лесные полосы (крупные просветы между стволами и практически без просветов в кронах) обеспечивают относительно равномерное распределение снежного покрова в межполосном пространстве, однако в самих лесных полосах вследствие выдувания его откладывается недостаточно, чтобы предохранить почву от промерзания. Такая конструкция уменьшает кольматирующую способность лесополосы, что связано с отсутствием кустарника в опушечных рядах.

Лесные полосы ажурной и плотной конструкции по характеру снегоотложения занимают промежуточное положение. В некоторые годы они накапливают возле себя большие сугробы, как и плотные. Также бывают случаи, когда снег из них выдувается, как из продуваемых. В целом ажурные лесополосы обеспечивают предохранение почвы от глубокого промерзания, однако не обеспечивают оптимального снегоотложения в межполосном пространстве.

Наилучший эффект на защищаемых полях дают лесополосы продуваемой конструкции, несколько хуже – ажурной (существенно укороченный снежный шлейф на прилегающих полях) и плотной (весь задерживаемый снег располагается в виде больших сугробов внутри самой лесной полосы). Каждая конструкция имеет свои преимущества и недостатки. Так, продуваемые полосы отлично распределяют снег на защищаемых полях, но в самой полосе он практически не накапливается и они испытывают недостаток влаги, вследствие чего ослабляются и начинают разрушаться. Как видно из анализа, ни одна из вышеперечисленных

конструкций не удовлетворяет условиям, необходимым для рационального воздействия на эрозионно-гидрологический процесс и, следовательно, необходим поиск новой конструкции. В идеале нужна такая конструкция лесной полосы, которая бы оптимально распределяла снег на защищаемых полях, как продуваемая, но и в достаточной степени обеспечивала потребности самого насаждения в воде. Для этого к концу зимы слой снега внутри полосы должен быть высотой 40-55 см.

Для выполнения этих функций нами была предложена комбинированная конструкция стокорегулирующей лесополосы [121]. Как известно, около 90 % метельного снега переносится на высоте до 10 см от поверхности почвы. Следовательно, создав препятствие необходимой высоты (в нашем случае 50 см), можно накапливать переносимый метелью снег до высоты преграды, а далее он будет через нее переноситься и равномерно откладываться в межполосном пространстве. На этом основано снегонакопительное и снегораспределительное действие лесополосы комбинированной конструкции. Поставленная цель достигается путем создания на водосборе системы стокорегулирующих лесополос из двух-трех рядов деревьев и одного ряда низкорослых кустарников (рис. 3.21). Лесная полоса такой конструкции имеет следующий вертикальный профиль по продуваемости: в нижней части, примерно до 0,5 м от поверхности земли – плотная, выше – до 1,5-2,0 м продуваемая (без сучьев), а еще выше ажурная. Плотную нижнюю часть лесополос создают методом подбора низ-

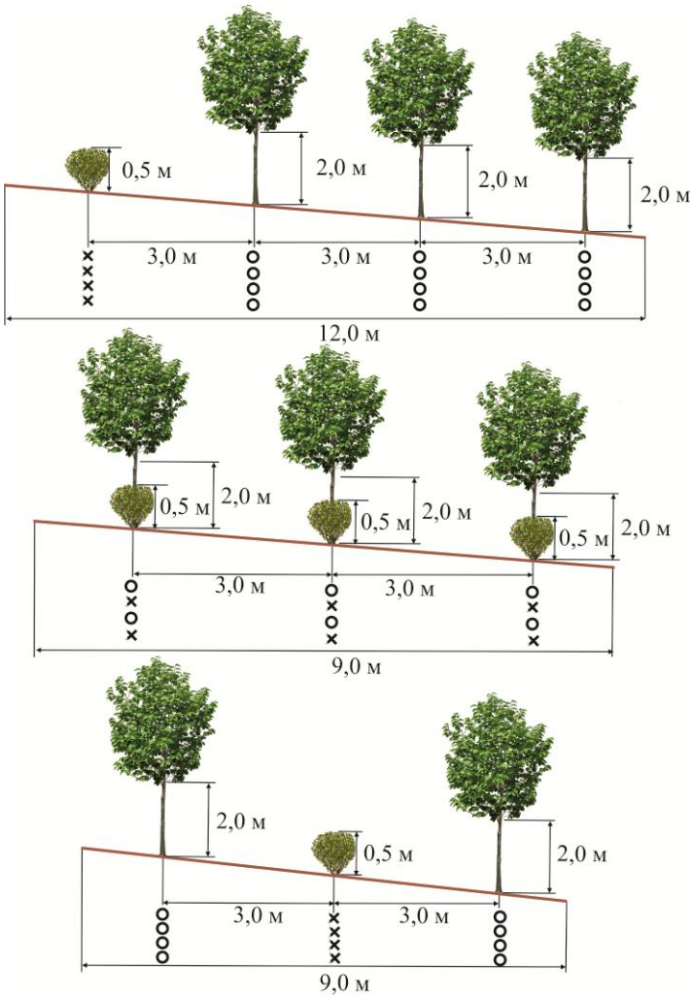


Рис. 3.21. Схема вариантов создания лесополос комбинированной конструкции

корослого кустарника при посадке или путем подрезки высокорослого кустарника до необходимой высоты в существующих лесополосах. Продуваемую часть профиля лесополосы формируют подбором пород без сучьев или с небольшим их количеством на высоте до 2 м при посадке или путем обрезки сучьев на деревьях в существующих лесополосах.

При этом продуваемость лесополос по профилю формируют следующую: в нижней части (до 0,3-0,5 м от поверхности земли) лесополоса должна быть плотная (до 10 % просветов и ветропроницаемость до 25-30 %), в средней (до 1,5-2,0 м) – продуваемая (свыше 60 % просветов и ветропроницаемость более 70 %) и в верхней (выше 2 м) ажурная или плотная (до 15-35 % просветов и ветропроницаемость 25-75 %). Она обеспечивает достаточно равномерное и эффективное снегораспределение и снегонакопление на прилегающих полях (действует как продуваемая), а за счет ряда низкорослого кустарника – необходимый снегозапас в самой полосе.

Внутри лесополос комбинированной конструкции по сравнению с продуваемой накапливается существенно больше снега, что обеспечивает успешный рост и устойчивое состояние лесополосы в суровых условиях засушливой степной зоны. Комбинированная конструкция к тому же обеспечивает более равномерное снегораспределение и более длинный, как и продуваемая, снежный шлейф на защищаемых полях.

Известно, что высота снежного покрова в лесной полосе существенно влияет на теплоизоляцию почв зимой, глубину и степень промерзания почвы и грунта, а следовательно, на водопоглощение, поверхностный сток и эрозию в период весеннего снеготаяния.

Специфика стокорегулирующих лесных полос состоит в том, что при их создании доминирует целевое назначение – обеспечение наилучшего снегораспределительного эффекта на защищаемых полях, а снегонакопление внутри самих лесных полос (для предотвращения почвы от промерзания и достижения достаточного влагообеспечения деревьев) рассматривается как второстепенный фактор, хотя это важное условие их долговечности и устойчивости.

Решить эту проблему позволит создание агролесоландшафтов с системами стокорегулирующих лесополос комбинированной конструкции за счет улучшения влагообеспеченности деревьев при сохранении высокого снегораспределительного эффекта на защищаемых полях. Это положительно скажется на продуктивности сель-

скохозяйственного производства и во многом на общем улучшении экологической обстановки в степной и лесостепной зонах РФ.

Результаты исследований влияния стокорегулирующих лесных полос на снегоотложение, влажность почвы и глубину ее промерзания в Волгоградской обл. приведены в табл. 3.31.

Таблица 3.31

Влияние лесополос разной конструкции на снегоотложение, влажность почвы и глубину промерзания (ФГУП Волгоградское)

Конструкция лесополосы	Высота снега, мм		Влажность почвы, %		Глубина промерзания, см	
	поле	лесополоса	поле	лесополоса	поле	лесополоса
2006 год						
Продуваемая	20	34	13,8	14,5	100	60
Плотная	20	60	12,3	16,5	120	15
Комбинированная	21	45	13,4	15,9	110	30
2007 год						
Продуваемая	3	15	18,0	13,4	30	30
Плотная	5	25	17,2	19,8	40	0
Комбинированная	4	20	19,4	18,9	40	5
2008 год						
Продуваемая	13	18	19,6	19,6	15	5
Плотная	11	38	22,1	27,1	15	0
Комбинированная	12	35	21,7	22,5	15	0
2009 год						
Продуваемая	9	20	21,8	21,5	10	0
Плотная	10	22	24,5	28,4	10	0
Комбинированная	9	23	23,7	25,2	10	0
2010 год						
Продуваемая	18	20	27,1	27,4	20	5
Плотная	15	30	30,1	30,2	20	0
Комбинированная	15	27	29,0	29,5	20	0

Благодаря использованию данного способа, с помощью низкорослого кустарника формируется конструкция лесополосы, способной в зимнее время накопить такое количество снега внутри себя, которое предотвратит глубокое промерзание почвы, обеспечит ее дополнительное увлажнение, необходимое для нормального роста и развития деревьев и кустарников, а также окажет мелиоративное влияние на сельскохозяйственные растения, выращиваемые в системе лесополос. В табл. 3.32 приведены данные, характеризующие снегоотложение и глубину промерзания почвы в лесополо-

сах комбинированной конструкции с низкорослым кустарником на светло-каштановых почвах Волгоградской обл.

Таблица 3.32

Характер снегоотложения и глубина промерзания в лесополосах комбинированной конструкции с низкорослым кустарником в ФГУП "Волгоградское", 2011-2015 гг.

Вариант	Высота снега, см		Глубина промерзания, см	
	поле	лесополоса	поле	лесополоса
Контроль (поле)	11	-	20	-
Лесополоса, кизильник горизонтальный	10	21	18	2
Лесополоса, миндаль низкий	11	19	20	3

Низкорослые кустарники кизильник горизонтальный и миндаль низкий в лесополосе комбинированной конструкции способствовали накоплению снега до 19-21 см (остальной откладывался в поле) и почти полному предотвращению промерзания почвы.

Исследования конструктивных особенностей лесных полос ведутся В. И. Пановым под руководством автора на Поволжской АГЛОС на стоково-эрозионном агролесомелиоративном стационаре с 4-рядной контурной лесной полосой из березы посадки 1974 г. Здесь созданы 3 варианта лесной полосы разной конструкции: продуваемая (стволы деревьев очищены от сучьев до высоты 2,0-2,2 м), комбинированная (кустарники и корневая поросль подстрижены до высоты 0,6-0,7 м, а стволы берез очищены от сучьев до высоты 2 м) и ажурная (подчистка сучьев и деревьев не проводилась, средняя просветность по всему поперечному профилю). В них проводились наблюдения за высотой и запасом воды снежного покрова, глубиной промерзания, весенним стоком и впитыванием, влагозапасом в почве, состоянием и ростом деревьев и др.

По результатам 4-летних исследований получены материалы, подтверждающие высокую снегозадерживающую и влагонакопительную эффективность комбинированной конструкции по сравнению с продуваемой (табл. 3.33).

Лесополосы комбинированной и ажурной конструкции накапливают внутри себя существенно больше снега (по высоте на 15-24 см, по влагозапасам на 36-54 мм), что обеспечивает успешный рост и устойчивое состояние лесополосы в суровых условиях засушливой степной зоны. В гидромелиоративном отношении

сравнение ажурной и комбинированной конструкции дает преимущество комбинированной, так как она обеспечивает более равномерное снегораспределение и более длинный (как и продуваемая конструкция) снежный шлейф на защищаемых полях.

Таблица 3.33

Снегозадерживающая и влагонакопительная эффективность контурных стокорегулирующих лесополос разной конструкции, 2003-2007 гг.

Конструкция лесной полосы	Высота снежного покрова, см	Влагозапасы, мм	Глубина промерзания почвы, см
Продуваемая	25	68	43
Комбинированная	40	104	27
Ажурная	49	122	21

Кроме того, высота снежного покрова в лесной полосе существенно влияет на теплоизоляцию почв зимой и на глубину промерзания почвы и грунта, а следовательно, и на водопоглощение, поверхностный сток и эрозию в период весеннего снеготаяния.

За все годы наблюдений в среднем наибольшая глубина промерзания почвы в конце зимы была в продуваемой лесной полосе (43 см), где и высота снега значительно ниже (25 см). Промерзание меньше в лесополосах комбинированной и ажурной конструкции (соответственно 27 и 21 см), что связано с лучшим снегонакоплением в этих полосах, с большей высотой снега (соответственно 40 и 49 см).

Дефицит влаги в лесополосе продуваемой конструкции существенно отразился и на ее состоянии. Деревья в средних рядах суховершинят и погибают, в крайних – имеют однобокую несомкнутую крону, что привело к распространению травяного покрова. Таким образом, продуваемая конструкция лесных полос, несмотря на достаточно высокую мелиоративную эффективность (мощный снежный шлейф и снижение скорости ветра на защищаемых полях) имеет ряд существенных недостатков. Это, прежде всего, ее недолговечность и слабая устойчивость, низкая инфильтрация (вследствие большой глубины промерзания почвы), меньшая биопродуктивность.

Вновь создаваемые контурные стокорегулирующие полосы целесообразно формировать из двух-трех рядов с междурядьями 3-4 м, средний ряд из низкорослых кустарников, крайние ряды из березы, лиственницы и других главных пород. Для повышения водо-

поглощения эти полосы усиливаются простейшими гидротехническими устройствами – валами, канавами, щелями-дренами с наполнителем и др. Такие полосы будут долговечными, устойчивыми и будут обладать высоким защитно-мелиоративным эффектом.

3.5.2. Система стокорегулирующих лесных полос с изменяющейся ветропроницаемостью

Разработанный нами прием регулирования снегоотложения [122] представляет собой систему стокорегулирующих лесополос с уменьшающейся (сверху вниз по склону) ветропроницаемостью (рис. 3.22). Он направлен на формирование оптимального снегоотложения на всей территории водосборного бассейна (от водораздела до тальвега) и позволяет предотвратить развитие эрозионных процессов. При этом создается максимально благоприятный режим для роста сельскохозяйственных культур. При создании такой системы лесополосы в зависимости от типа конструкции размещают по контуру или поперек склона следующим образом (от водораздела): продуваемая, ажурно-продуваемая, ажурная, плотная (прибалочная). Если на длинном склоне количество стокорегулирующих лесополос будет больше указанного, то все последующие к водоразделу полосы создаются продуваемыми. Такое расположение лесополос позволяет снизить скорость метелевого потока и не допустить сноса снега в балки и овраги, равномерно распределить снежный покров на межполосном пространстве, способствуя сохранению весенней влаги, необходимой для развития сельскохозяйственных культур.

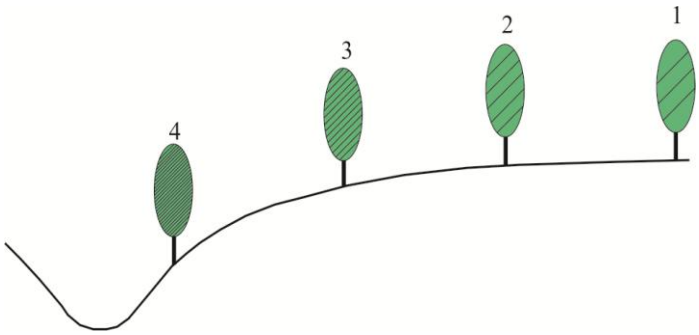


Рис. 3.22. Схема размещения системы стокорегулирующих лесополос с изменяющейся ветропроницаемостью. Конструкции лесополос: 1 – продуваемая, 2 – ажурно-продуваемая, 3 – ажурная, 4 – плотная

При таком сочетании лесных полос почти весь выпавший снег откладывается на полях равномерно с увеличением мощности его сверху вниз, что обусловливает постепенное стаивание его в

этом же направлении. Система защитных лесных насаждений с изменяющейся ветропроницаемостью обеспечивает равномерное распределение снега по всему склону, предупреждая образование больших снежных наносов и препятствуя смыву почвы.

В такой системе лесополос механизм эрозионно-гидрологического процесса на склоне следующий. Известно, что смыв начинается тогда, когда почва освобождается от снега. Если снег сходит постепенно сверху вниз по склону, то талая вода, стекающая по освобожденной поверхности, попадая в снег, еще лежащий в нижней части, не производит на ней смыв. Таким образом, постепенный (сверху вниз по склону) сход снега может резко уменьшить смыв почвы или полностью предотвратить его. Этому приему дана экспериментальная оценка в ФГУП "Волгоградское", где весь выпавший снег откладывался и перераспределялся на полях практически равномерно с небольшим увеличением его мощности при движении вниз по склону (рис. 3.23).

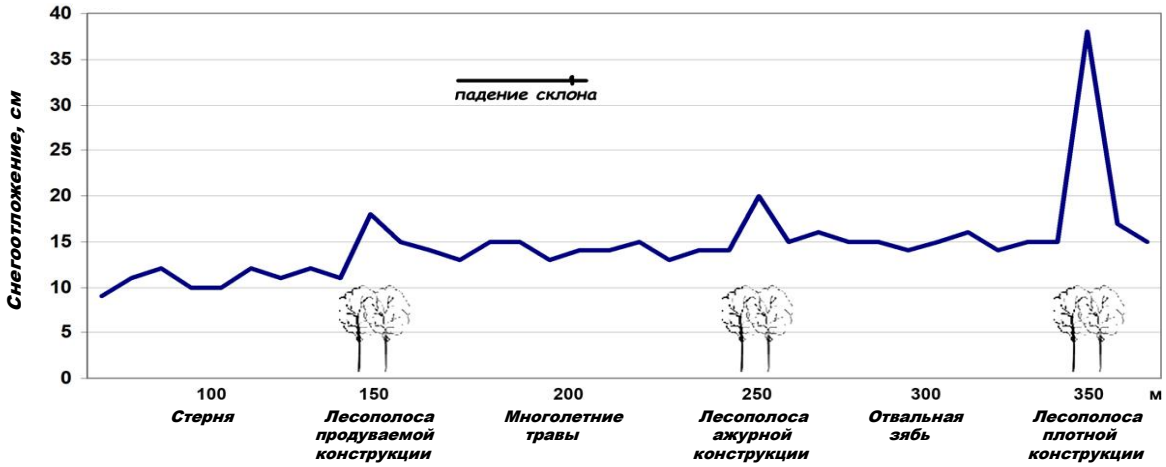


Рис. 3.23. Снегоотложение в системе контурных стокорегулирующих лесных полос с изменяющейся ветропроницаемостью, ФГУП "Волгоградское"

3.5.3. Кулисы в межполосном пространстве стокорегулирующих лесных полос

На межшлейфовых участках межполосных пространств в качестве как снежной, так и средозащитной (стокорегулирующей и противоэрозионной) мелиорации перспективно создание кулис из высокостебельных сельскохозяйственных растений (рис. 3.24). Расстояния между кулисами принимаются 4-12 м с уменьшением вниз по склону. Кулисы, создав препятствие, способствуют отложению слоя снега равного высоте преграды. При превышении

этой высоты он через нее переносится и равномерно откладывается в межполосном пространстве. Кулисы позволяют предотвратить глубокое промерзание почвы. За счет дробления склона вдоль линий тока они смогут более эффективно зарегулировать сток и сократить вынос мелкозема с полей.

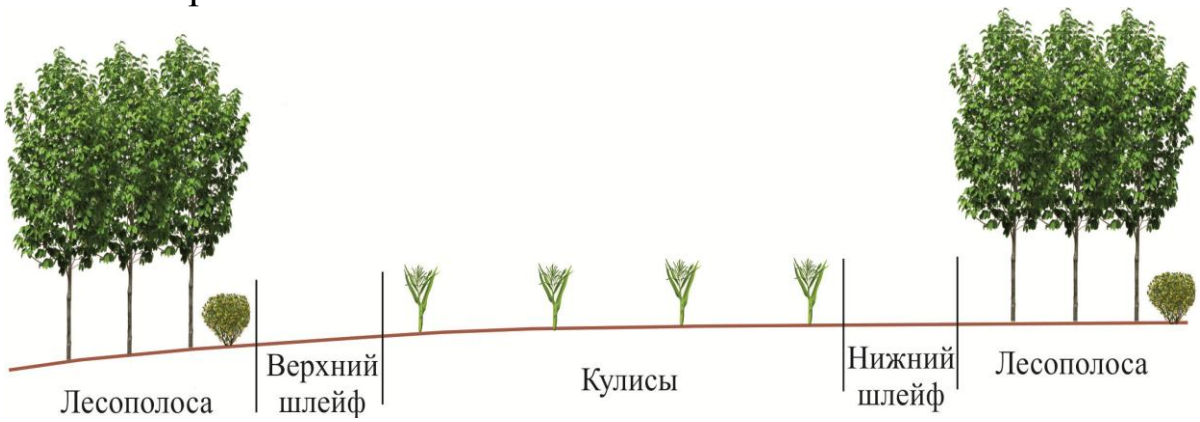


Рис. 3.24. Схема стокорегулирующих лесополос с кулисами из высокостебельных сельскохозяйственных растений в межшлейфовом пространстве

В ФГУП "Волгоградское" выявлено положительное влияние кулис на природные факторы стока (табл. 3.34). Средняя высота

Таблица 3.34

Влияние кулис на снегоотложение, влажность почвы и глубину ее промерзания, ФГУП "Волгоградское"

Место определения	Высота снега, см	Запас воды в снеге, мм	Влажность почвы в слое 0-50 см, %	Глубина промерзания, см	Водопоглощение, мм
Контроль (без кулис)	14	40	12,1	15	40
Кулисы:	27	76			76
в самой кулисе	44	125	15,7	0	125
на межкулисном пространстве	19	54	14,3	7	54

снега на площадке с кулисами – 19 см (шлейфы достигали 47 см), а на контроле – 14 см. В результате средние снегозапасы на площадке с кулисами составляли 76 мм, а без кулис – 40 мм. Кулисы, накопив дополнительное количество снега, способствовали увеличению влажности почвы, снижению ее промерзания до 0-7 см и повышению водопоглощения на 36 мм.

4. СИСТЕМА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЭРОЗИОННО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

4.1. Общая характеристика противоэрозионных приемов

Для борьбы с водной эрозией почв А. С. Козменко [2] впервые в 20-х гг. прошлого века предложил идею комплексного подхода с охватом целых водосборов и осуществил ее на Новосильской опытно-овражной станции (ныне Новосильская ЗАГЛОС – филиал ФНЦ агроэкологии РАН). Противоэрозионный комплекс включает организационно-хозяйственные, лесомелиоративные, агротехнические, лугомелиоративные и гидротехнические мероприятия. В последующем он совершенствовался многими исследователями [4, 5, 9, 12, 13, 18, 123]. Все противоэрозионные мероприятия можно разделить на 3 основные группы [63]. В 1-ю группу входят приемы, влияющие рассредоточено по территории на водопоглощение и сток. Это приемы поверхностного водозадержания (вспашка поперек склона или по контуру, искусственный микрорельеф, щелевание и др.), безотвальные и мульчирующие обработки, снегозадержание и регулирование снеготаяния, полосные посевы, приемы повышения водопроницаемости почвы (глубокое рыхление, окультуривание, оструктуривание) и другие. Во 2-ю группу входят приемы локального действия – линейные рубежи: водоотводящие и водозадерживающие валы, канавы с валами, валы-террасы и др. В 3-ю группу входят приемы, обладающие свойствами локального действия (задержание и регулирование стока на рубежах) и пространственного влияния (задержание воды в поле на месте выпадения осадков). Это лесомелиоративные приемы. Они могут сочетаться с приемами 2-й группы. Есть ряд промежуточных приемов (щелевание, кулисные и полосные посевы и т. д.), сочетающих в себе свойства 1-й и 2-й групп. Нами они отнесены к первой группе.

4.2. Концепция адаптивно-ландшафтного обустройства сельскохозяйственных земель и совершенствования системы земледелия

Эрозия почв является одним из главных факторов деградации сельскохозяйственных земель, вызываемым комплексом причин. Наиболее важные из них: истощительное сельскохозяйственное землепользование, представляющее реальную угрозу продовольственной безопасности страны; низкое качество проектирования управления землепользованием; сведение лесов, низкие объемы лесопосадок и лесовосстановления и, как следствие, существенное изменение гидротермического режима территории; рост потерь почвы от эрозии, увеличение опасности оврагообразования; высокая степень распаханности земель (например, в степной зоне распахано до 90 % земель), ведущая к процессам водной эрозии, снижению гумусности почв; распашка сухих почв легкого гранулометрического состава; недостатки практики пастбищного животноводства [124].

Проводимая земельная реформа не способствует осуществлению мероприятий по защите почв от деградации [125]. Собственники земли, как правило, не занимаются земледелием, а передают паи в аренду. С одной стороны арендатор не заинтересован вкладывать средства в ее сохранение, а с другой – на мелких участках земли невозможно строить эффективную противодеградационную систему мероприятий.

Кроме того, в стране разрушена система проектных организаций, которые разрабатывали проекты землеустройства с системой противодеградационных мер. Поэтому сейчас на земле хозяйничают по принципу "кто во что горазд". Не создана также правовая база, повышающая мотивацию сельскохозяйственных товаропроизводителей на сохранение земли от деградации.

Главной задачей применяемых в настоящее время систем земледелия является получение максимального количества продукции (приоритетная цель), а борьба с деградацией отодвигается на второй план. Технологии и системы земледелия (в частности, паровая), интенсифицируемые за счет насыщения ресурсами, обеспечивают высокую продуктивность сельхозкультур ценой огромных потерь почвенного плодородия вследствие эрозии, дефляции и дегумификации почв. Иначе говоря, действующая ныне система земледелия не имеет достаточной почвозащитной направленности. Не осуще-

ствляется противоэрозионная организация территории, не выделяются смытые земли под почвозащитные (травопольные) севообороты и постоянное залужение, в ограниченных объемах выполняются противоэрозионные агротехнические и лугомелиоративные мероприятия, не создаются защитные лесные насаждения, устройство простых и сложных гидротехнических сооружений у вершин оврагов без применения комплекса противоэрозионных мероприятий на водосборе приводит к неоправданным затратам труда и средств, а в ряде случаев к усилению эрозионных процессов.

Интенсивная сельскохозяйственная деятельность привела к катастрофическим изменениям ландшафтов. Наиболее существенными оказались изменения в почвенном покрове: разрушение почвенной структуры, ухудшение водно-физических свойств – плотности, воздушного режима, инфильтрационной способности. Это привело к изменениям водного баланса, ухудшению влагообеспеченности, возникновению эрозии и дефляции и деградации природной среды. В целях ослабления, прекращения процессов деградации и восстановления экосистем предлагается концепция адаптивно-ландшафтного природопользования.

Адаптивно-ландшафтный принцип природопользования предполагает неистощительный характер землепользования. Он предполагает систему землепользования, направленную на поддержание баланса между расходом ресурсов и их восстановлением. В применяющейся, например, системе земледелия Волгоградской обл. основное внимание уделяется земледельческим проблемам, главной задачей является получение максимального количества продукции. Особенностью этой системы земледелия было увеличение площади чистых паров до 20 %, а в последние годы и до 50 %. Это обеспечивало повышение урожайности зерновых культур, однако способствовало усилению эрозионных процессов и деградации почв. Иначе говоря, действующая ныне система земледелия не имеет достаточной почвозащитной направленности. Не осуществляется противоэрозионная организация территории, не выделяются смытые земли под почвозащитные севообороты и постоянное залужение. В ограниченных объемах выполняются противоэрозионные агротехнические и лугомелиоративные мероприятия, не создаются ЗЛН, а устройство простых и сложных гидротехнических сооружений у вершин оврагов без применения комплекса противоэрозионных мероприя-

тий на водосборе приводит к неоправданным затратам труда и средств, а в ряде случаев к усилению эрозионных процессов.

Системы земледелия должны строиться на принципах адаптивно-ландшафтного обустройства территории.

Адаптивно-ландшафтное земледелие – это сельскохозяйственная деятельность, при которой максимально учитываются особенности природных и антропогенных ландшафтов, требовательность сельскохозяйственных культур к условиям произрастания, оптимально реализуется ресурсный потенциал, каждый земельный участок используется с учетом его агроэкологической оценки.

Целью адаптивно-ландшафтного земледелия является создание таких условий, при которых сохранялись бы природные ландшафты, улучшались агроландшафты и восстанавливались деградированные земли. Для достижения этой цели уже на стадии разработки проектов землеустройства необходимо решить следующие задачи:

дать оценку природно-ресурсного потенциала и факторов деградации (эрозия, дефляция, засоление) и их влияния на современное состояние агроландшафтов;

провести агроэкологическую оценку и типизацию земель;

определить оптимальное соотношение угодий и видов пашни;

осуществить почвозащитную организацию землепользования;

дать адаптивно-ландшафтное обоснование элементов системы земледелия;

выполнить проектирование агротехнологий, в т. ч. культуртехнических, влагосберегающих и агролесомелиоративных;

провести эколого-экономическую оценку системы ландшафтного земледелия.

Основными принципами разработки системы адаптивно-ландшафтного земледелия являются:

системный подход, предполагающий создание агроэкосистем разного уровня организации, которые имеют множество типов и уровней связи как в пределах системы, так и между системами разных типов;

адаптивность систем земледелия к природно-экономическим и экологическим условиям (адаптация культур и сортов к конкретным условиям произрастания, адаптация технологий, адаптивное управление природно-ресурсным потенциалом и т. д.);

устойчивость функционирования агроэкосистем, достигаемая оптимизацией элементов систем земледелия с учетом ре-

сурсного потенциала агроландшафтов;

почвозащитная и природоохранная направленность, обеспечивающая снижение до допустимых пределов эрозии и дефляции почв, предотвращение загрязнения почв и среды биогенными веществами, прекращение деградации почв и получение экологически чистой продукции;

социально-экономическая целесообразность, предусматривающая рациональное использование антропогенных ресурсов за счет применения наиболее экономически эффективных мероприятий, приемов и их сочетаний (оптимальная структура посевов, севооборотов, сортов, удобрений, мелиораций и др.).

Элементами систем адаптивно-ландшафтного земледелия являются организация землепользования, структура посевных площадей, севообороты, почвозащитные технологии возделывания сельскохозяйственных культур и системы машин, агротехнические, лесомелиоративные, лугомелиоративные, гидротехнические и другие мероприятия.

Согласно предлагаемой концепции структура посевных площадей и система севооборотов должны строиться исходя из социально-экономической целесообразности, агроэкологических условий выделенных групп земель, адекватности им требовательности растений к условиям произрастания и их почвозащитной эффективности и др. На землях одной из групп должны размещаться парозерновые и парозернопропашные севообороты с максимальным насыщением высокопродуктивными культурами, второй – почвозащитные севообороты без паров с максимальным насыщением многолетними травами. Земли третьей группы следует отводить под улучшенные сенокосы и пастбища и под лес.

Почвозащитные технологии возделывания сельскохозяйственных культур должны иметь в первую очередь противоэрозионную и стокорегулирующую направленность, что позволит создавать благоприятные условия для произрастания растений. Они должны обеспечивать создание оптимальных свойств пахотного слоя, высокую противоэрозионную устойчивость почвы, накопление и сохранение в ней влаги выпадающих осадков и др. Этим условиям в наибольшей степени отвечает дифференцированный подход к обработке почвы – чередование отвальных, безотвальных и минимальных обработок, а при достаточном увлажнении переход к нулевым обработкам. Минимизация обработки вплоть

до нулевой с формированием мульчирующего слоя из измельченной соломы создает условия, наиболее близкие к естественному процессу почвообразования и накопления гумуса. Этим закладывается основа для предупреждения деградации почв.

Система удобрения должна отвечать следующим требованиям:

максимальный учет агроэкологических условий группы земель, уровня плодородия почв и потребности растений в питательных веществах;

предотвращение загрязнения продукции, что достигается внесением оптимальных доз удобрений, включением в севообороты буферного промежуточного звена, применением поукосных и пожнивных посевов, запашкой соломы, компостированием органических остатков с минеральными удобрениями;

тщательный контроль за балансом питательных веществ.

Неотъемлемой частью адаптивно-ландшафтного земледелия является агролесомелиорация. Наибольшее мелиорирующее влияние защитных лесных насаждений, имеющих многофункциональное назначение, проявляется при их системном пространственном размещении.

Основные виды защитных лесонасаждений на сельскохозяйственных землях – полезащитные (ветроломные и стокорегулирующие), прибалочные и приовражные лесные полосы, насаждения в гидрографической сети, на песках, пастбищных землях, озеленительные посадки.

Ветроломные лесные полосы должны размещаться на дефляционно-опасных и подверженных дефляции землях с целью защиты их от ветровой эрозии, засух и суховеев. Стокорегулирующие лесные полосы – по горизонталям или близко к ним с целью выполнения стокорегулирующих, почвозащитных и ветроломных функций на склонах любой крутизны. Для повышения стокорегулирующей роли их необходимо сочетать с простейшими гидротехническими сооружениями (обвалование, канавы с валами и др.). Вдоль бровок балок при отсутствии балочных лесных насаждений создаются прибалочные лесные полосы, а на сильносмытых и размытых землях гидрографической сети осуществляется сплошное облесение.

Лугомелиорация осуществляется на берегах гидрографической сети и на прилегающих к ней землях, отведенных под постоянное залужение. Улучшение и повышение продуктивности естественных кормовых угодий должно преследовать цель увеличения

Рис. 4.1. Структурная схема модели адаптивно-ландшафтного обустройства территории и систем земледелия

производства кормов и защиты почв от эрозии и дефляции, рек и водоемов от заиления и загрязнения. Поверхностное и коренное улучшение травостоя должно применяться в зависимости от вида угодий, состояния растительности, уровня грунтовых вод, эродированности почв, микроклиматических особенностей по экспозициям склонов. Кроме того, кормопроизводство должно осуществляться на пашне в севооборотах, преимущественно почвозащитных.

Гидротехнические мероприятия должны применяться как самостоятельно (валы-террасы на пашне, водозадерживающие и водоотводящие валы у вершин оврагов, валы-плотины в гидрографической сети и др.), так и в сочетании со стокорегулирующими лесополосами (валы по нижней опушке лесополос, канавы в нижнем междурядье и др.).

Структурная схема модели адаптивно-ландшафтного обустройства территории и системы земледелия приведена на рис. 4.1.

В настоящей концепции адаптивно-ландшафтного земледелия изложены общие подходы к разработке схемы ландшафтного земледелия. Конкретные проработки должны осуществляться в проектах систем адаптивно-ландшафтного земледелия для хозяйств разных форм собственности.

4.3. Научное обоснование адаптивно-ландшафтного обустройства сельскохозяйственных земель

Эрозионно-гидрологический процесс представляет собой совокупность гидрологического, эрозионного, аккумулятивного процессов и их сочетания. Гидрологический и эрозионный процессы в совокупности составляют понятие эрозионно-гидрологического процесса – достаточно сложного природного явления с учетом его антропогенной модификации [40]. При его исследовании гидрологический и эрозионно-аккумулятивный процессы рассматриваются как взаимосвязанные и взаимообусловленные совокупности (имеющие прямые и обратные связи). При нерациональном ведении сельскохозяйственного производства (интенсивное земледелие, чрезмерный выпас скота) уменьшается противоэрозионная устойчивость и инфильтрационная способность почвы, приводящие к увеличению слоя и интенсивности склонового стока. Эрозионно-аккумулятивный процесс усиливается и приводит к уменьшению мощности гумусового горизонта и содержания гумуса и ухудшению водно-физических и химиче-

ских свойств почвы, снижению плодородия в целом [125-127].

Во ВНИАЛМИ на протяжении многих лет разрабатывалась технология адаптивно-ландшафтного обустройства территории. Она строится на комплексном подходе к разработке системы мероприятий на всем водосборном бассейне на основе новейших достижений науки. Для защиты почвы от эрозии необходимо знание закономерностей формирования поверхностного стока, процессов смыва и размыва, инфильтрационной способности почв, особенностей характера впитывания воды в мерзлые и талые грунты и др.

4.3.1. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод

Сток талых вод протекает при сложном взаимодействии природных и антропогенных факторов, которые необходимо рассматривать не в отдельности, а с учетом совокупности их влияния.

На основе обобщения и анализа многолетних (60-68 лет) данных ВНИАЛМИ и литературных источников (всего 150 годоопытов), характеризующих связь стока талых вод на рыхлой и уплотненной пашне с запасами воды в снеге и почве (в слое 0-50 см) перед снеготаянием, глубиной промерзания почвы и продолжительностью снеготаяния на юге ЦРНЗ, в ЦЧО и Поволжье, автором сформулирован и апробирован *закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод* (см. в разделе 3.3). Установлено, что важнейшими природными факторами стока являются снегозапасы, увлажнение и глубина промерзания почвы. Определены максимальные значения факторов, при которых сток не формируется. При уровнях факторов выше лимитирующих дана количественная оценка их влияния на сток.

Установлено, что почва как саморегулирующаяся система, способна поглотить и удержать определенное количество воды, равное дефициту влажности, максимальная величина которого в мерзлом состоянии может достигать полной влагоемкости верхнего слоя. Дефицит влаги (разница между полной влагоемкостью $W_{пв}$ и фактическими влагозапасами $W_ф$) обусловливает величину водопоглощения. Слой стока $У$ зависит от дефицита влаги в почве ΔW и снегозапасов W_c перед снеготаянием. В общем виде уравнение можно записать так:

$$У = W_c - (W_{пв} - W_ф) = W_c - \Delta W. \qquad (54)$$

Опираясь на выявленные закономерности и связи, был разра-

ботан метод расчета величины поверхностного стока с сельскохозяйственной территории (водосбор) при разных уровнях важнейших природных факторов с учетом типов почв, видов угодий и состояния пашни (см. в разделе 3.3.2) [112].

4.3.2. Закономерности впитывания воды в почву

Инфильтрация воды в талую почву,
формирование сплошной менисковой пленки

Е. А. Гаршинёв в своей работе глубоко проанализировал вопросы инфильтрации воды в талую и мерзлую почву [40]. Он отмечает, что при взаимодействии осадков с субстратом, как только все поры и поверхность элементарных почвенных частиц и почвенных агрегатов будут полностью заняты водой, на поверхности субстрата образуется сплошная менисковая пленка (рис. 4.2). Эта пленка обладает двумя важными свойствами: вертикальной гидравлической проводимостью и сплошностью водной поверхности в просветах капилляров и на смоченной поверхности элементарных почвенных частиц. Первое свойство обусловливает собственно инфильтрацию, второе создает тангенциальную (касательную) составляющую водного потока и формирует хотя бы незначительный микросток по поверхности сплошной менисковой пленки и элементарных почвенных частиц.

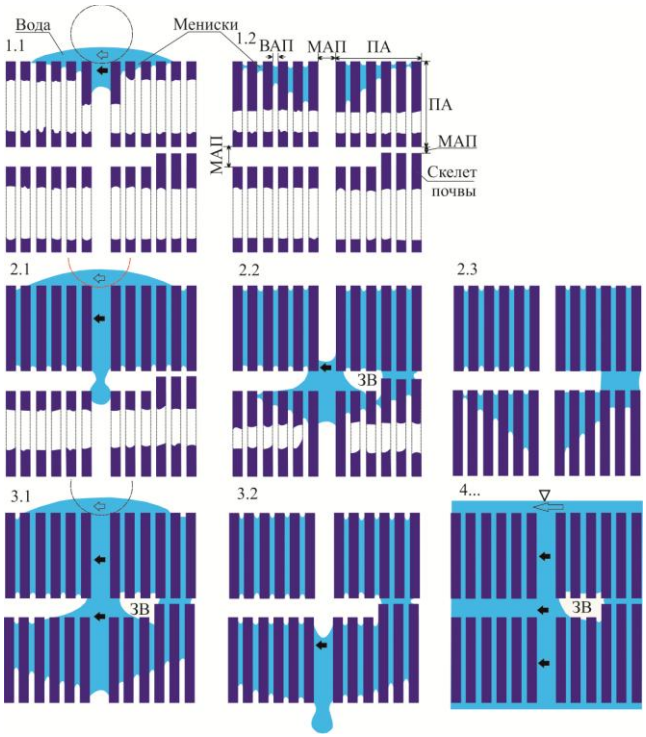


Рис. 4.2. Этапы (1.1-4...) взаимодействия влаги осадков с почвой, образования сплошной менисковой пленки, просачивания влаги в почву и формирования внутрипочвенного и поверхностного стока (стрелки):

ПА – почвенный агрегат, ВАП – внутриагрегатные поры, МАП – межагрегатные поры, ЗВ – полость с защемленным воздухом

Разработанная им концепция сплошной менисковой пленки объясняет важнейшие гидрологические эффекты (явления): отсутствие стока при наличии значительной некапиллярной скважности (сплошная менисковая пленка не формируется), появление стока как следствие образования сплошной менисковой пленки, увеличение интенсивности инфильтрации (и стока) при возрастании интенсивности осадков, уменьшение вероятности образования и более позднее возникновение сплошной менисковой пленки при дождях малой интенсивности с малыми размерами капель, формирование сплошной менисковой пленки на большей глубине при хорошей оструктуренности почвы и высокой водопрочности почвенных агрегатов, образование "внутреннего" микрорельефа в почве и внутрипочвенного стока и др.

Очень важна связь сплошной менисковой пленки со стоком. На основании изложенного можно сформулировать общее правило: сток формируется только после образования сплошной менисковой пленки.

Инфильтрация воды в мерзлую почву, формирование "ледяного экрана"

Инфильтрационная способность мерзлых почв определяется иными физическими процессами [40]. Е. А. Гаршинёв отмечал, что водопроницаемость мерзлых почв значительно ниже, чем талых, что объясняется снижением инфильтрационной способности за счет закупорки пор льдом. Считают, что чем выше влажность мерзлой почвы и ниже ее температура, тем большая часть пор заполняется льдом и тем ниже ее инфильтрационная способность. Однако инфильтрационная модель водопроницаемости мерзлых почв не объясняет ряд важных явлений: почему формируется талый сток при исключительно низкой интенсивности снеготаяния (0,001-0,010 мм/мин) и наличии огромной свободной пористости (обычно около 50-60 % объема пор); почему объем усвоенной влаги при оттаивании мерзлой почвы в точности равен объему свободных пор в оттаявшем слое. Оба эти явления он объяснил с позиций концепции "ледяного экрана", образующегося при снеготаянии в результате тепломассообмена (рис. 4.3). Суть концепции "ледяного экрана" в следующем. При снеготаянии в результате теплообмена талая вода, отнимая часть запасов холода почвы, пре-

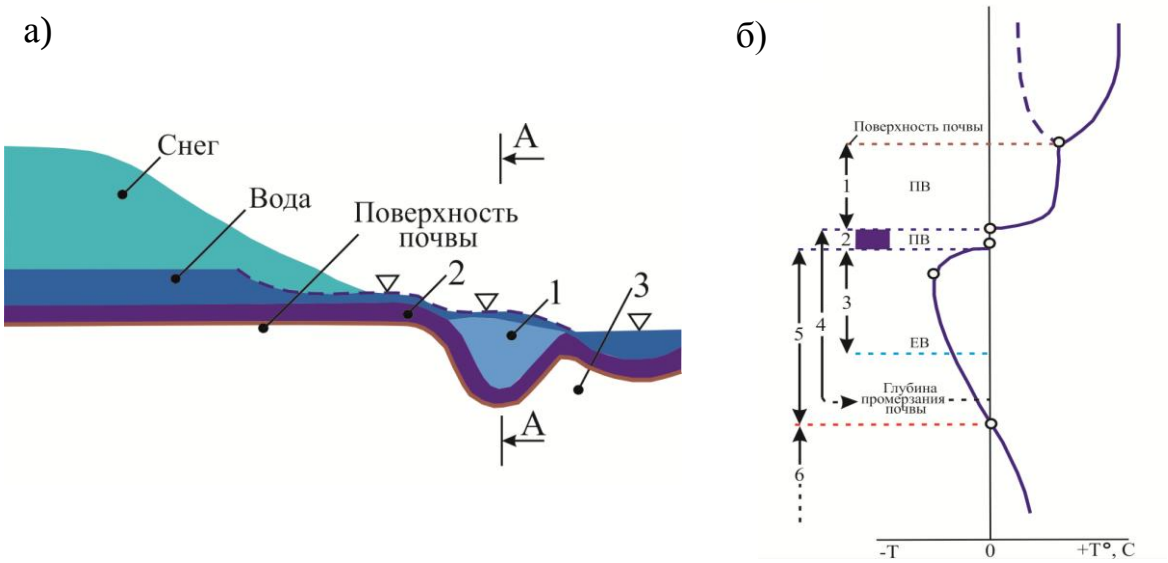


Рис. 4.3. Принципиальная схема формирования "ледяного экрана" при снеготаянии и оттаивании почвы (а), хода температуры воздуха и почвы, распределения ее влажности (б). Почвенные слои: 1 – оттаявший, 2 – с "ледяным экраном", 3 – "запирающий", 4 – мерзлый, 5 – с отрицательными и 6 – положительными температурами

вращается в лед, полностью перекрывающий все почвенные поры и создающий феномен неводопроницаемого слоя (экрана). Лишь после разрушения "ледяного экрана" (оттаивания почвы) начинается собственно инфильтрация. За период снеготаяния, как правило, почва не успевает полностью оттаять, и количество усвоенной влаги поэтому в точности равно объему свободных пор в оттаявшем слое. Это обстоятельство объясняется способностью почвы как саморегулирующейся системы поглотить и удержать определенное количество воды, определяемое дефицитом влажности. Процесс заполнения талой водой пор оттаявшего слоя называется термоинфильтрацией. Концепция "ледяного экрана" легко объясняет многие наблюдаемые явления: образование льда под снегом на поверхности почвы в начале снеготаяния, наличие льда в днищах ручьев на склонах, резкий скачок влажности от полной влагоемкости до естественной влажности при переходе от оттаявшей почвы к мерзлой (означает отсутствие признаков проникновения влаги под "ледяной экран" в мерзлый слой почвы), отсутствие влияния глубины промерзания почвы в слое более 30-50 см на усвоение влаги, равенство ее количества в оттаявшем слое почвы дефициту его влажности. Мощность этого слоя в годы со стоком варьирует в пределах 3-70 см, составляя в среднем 9-27 на рыхлой пашне и 8-10 (до 24) см на уплотненной, и убывает от 15-27 в лесостепи до 9-19 см в сухой

степи [81]. Таким образом, усвоение влаги мерзлой почвой определяется верхним слоем небольшой мощности. В рамках концепции "ледяного экрана" и термоинфильтрации находят объяснение указанные парадоксы усвоения влаги мерзлой почвой, а также низкий стокорегулирующий эффект или его отсутствие при применении агротехнических приемов регулирования стока (поделка микрорельефа, поперечная вспашка, рыхление, кротование и т. д.) во всех тех случаях, когда они не обеспечивают контакт воды с талыми (незамерзшими) слоями почвы. Этот контакт может обеспечить лишь глубокое (ниже границы промерзания) щелевание почвы, устройство водопоглощающих канав, создание лесополос, обеспечивающих резкое уменьшение глубины промерзания почвы или исключающих его, особенно при их сочетании с гидротехническими устройствами (канавы с талым дном).

4.4. Адаптивно-ландшафтное обустройство сельскохозяйственных земель и разработка почвозащитных систем земледелия

4.4.1. Противоэрозионная организация территории

В эрозионных ландшафтах первоочередная задача оптимизации земледелия связывается с противоэрозионной организацией территории, предусматривающей выделение севооборотных массивов с учетом крутизны склона, эродированности почв, интенсивности процессов эрозии; выбор и разработку схем севооборотов; определение размеров полей и размещение их на территории; рациональное размещение лесных полос и других линейных рубежей; определение приемов и технологий обработки почвы, мест гидротехнических сооружений и способов улучшения суходольных лугов.

Определяющим моментом агроландшафтного обоснования организации землепользования является типология земель (выделение контуров по однородным агроэкологическим условиям) и определение характера их использования, а также применение технологий, приемов и мероприятий, обеспечивающих нормальное функционирование агроэкосистем.

При планировании комплекса противоэрозионных мероприятий необходимо исходить из того, что в ходе процессов рельефообразования, а также под воздействием природных и антропогенных факторов на водосборных бассейнах разного ранга

и их склонах сложились различные почвенно-экологические условия, чем и обусловлено выделение ландшафтных поясов – эрозионных земельных фондов.

В приводораздельной части склонов крутизной до 2-3° почвы несмытые и слабосмытые. Процессы эрозии здесь протекают слабо, интенсивность смыва часто не превышает скорость естественного почвообразовательного процесса (1-2 т/га). Однако эта территория является ареной формирования стока, который, поступая на присетевые участки склонов и в гидрографическую сеть, приводит к смыву почвы и размыву почвогрунтов, а также к выносу биогенных веществ в водные источники. Здесь противоэрозионные мероприятия должны быть направлены на задержание воды на месте или безопасный сброс в зависимости от природной зоны.

В присетевой части на склонах круче 2-3° образуется полоса средне- и сильносмытых почв, характеризующихся пониженным содержанием гумуса, ухудшенными водно-физическими и химическими свойствами и сильной податливостью эрозии. Здесь в основном протекают процессы смыва (часто и размыва – оврагообразования) как за счет собственного стока, так и за счет подтока с вышележащей территории, поэтому противоэрозионные мероприятия должны быть направлены на защиту почв от смыва, восстановление и повышение плодородия.

В гидрографической сети протекают в основном процессы размыва и смыва, распространены здесь сильно и весьма сильно смытые почвы, но имеются и несмытые, слабо- и среднесмытые, а также намытые почвы. Мероприятия на этих угодьях должны быть направлены на предохранение их от размыва и смыва.

Приводораздельные и присетевые склоны, а также земли гидрографической сети выделяются в виде ландшафтных поясов (фондов) при составлении ландшафтных карт местности. Для каждого из этих фондов определяется свой характер использования и набор противоэрозионных мероприятий.

Критериями для выделения разных групп земель на склонах являются характер гидрологических и эрозионных процессов, состояние почв, местонахождение в рельефе, доступность для проведения механизированных работ и др. [124].

Модели адаптивно-ландшафтного обустройства территории и системы земледелия разрабатываются на основе оценки ее природно-ресурсного потенциала – природно-климатических условий, земельных ресурсов, степени деградации земель, анализа совокупно-

сти показателей и критериев для классификации ландшафтов [126].

Россия имеет большой опыт по разработке научных основ борьбы с деградацией. Цикл работ, проведенный под руководством В. В. Докучаева, заложил в качестве противодеградационной основы принципы, названные позже принципами адаптивно-ландшафтного землепользования. Однако в дальнейшем они не стали основой практического сельского хозяйства, несмотря на усилия государственных органов и научных учреждений. Позднее они были значительно усовершенствованы.

А. С. Козменко [2, 3] разработал классификацию склоновых земель. По этой классификации на территории от водораздела до дна гидрографической сети выделяются 3 земельных фонда:

1. Приводораздельный фонд – ровные участки и пологие склоны, имеющие крутизну до 3°.

2. Присетевой фонд – земли крутизной свыше 3° и примыкающие к гидрографической сети.

3. Гидрографический фонд – берега, крутосклоны и днища лощин, суходолов (балок) и речных долин.

Эта классификация в последующем совершенствовалась и уточнялась Г. П. Сурмачем [5]. Он дифференцировал критерии определения границ фондов для серых лесных почв и черноземов, а также дополнительно к крутизне предложил учитывать длину склона и смытость почвы. Приводораздельный фонд он предложил выделять на пологих склонах, имеющих крутизну до $2,5\text{-}3,5^{o}$ на серых лесных почвах и до $3,5\text{-}4,0^{o}$ на черноземах. При большей длине склона нижняя граница приводораздельного земельного фонда проводится в зоне с меньшей его крутизной, а при малой длине она опускается ниже по склону и проходит по более крутой его части, или по бровке гидрографической сети (если присетевой фонд не выделяется). При этом принимается во внимание также степень смытости почв. Нижняя граница приводораздельного фонда является верхней границей присетевого фонда, а его нижняя граница проходит на участке склона крутизной $8\text{-}10^{o}$.

Имеются другие более дробные классификации, которые насчитывают 9 и более категорий земель. Они недостаточно научно обоснованы и трудно применимы в практике, поэтому мы их здесь не рассматриваем.

В. И. Кирюшиным разработана методология построения модели систем земледелия [128, 129] на основе учета природно-эколо-

гических и социально экономических условий. Им сформулировано определение адаптивно-ландшафтной системы земледелия: "система использования земли определенной агроэкологической группы, ориентированная на производство продукции экономически и экологически обусловленного количества и качества в соответствии с общественными (рыночными) потребностями, природными и производственными ресурсами, обеспечивающая устойчивость агроландшафта и воспроизводство почвенного плодородия" [130].

Необходимо пересмотреть идеологию систем земледелия. Она должна строиться на адаптивно-ландшафтных принципах [131-133]. Они предусматривают смену приоритетов – на первое место ставится природоохранный принцип природопользования. При этом максимально учитываются особенности природных и антропогенных ландшафтов, требовательность сельскохозяйственных культур к условиям произрастания, оптимально реализуется ресурсный потенциал, каждый земельный участок используется с учетом его экологических условий и типологии земель.

При определении характера использования земель важно учитывать биологические особенности и почвоскрепляющие свойства сельскохозяйственных культур. Они по-разному реагируют на условия произрастания. В табл. 4.1 приведены данные, характеризующие степень снижения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от степени смытости почвы [134].

Таблица 4.1

Уровень урожайности сельскохозяйственных культур на почвах разной степени эродированности, % к несмытой почве

Культура	Степень смытости почв		
	слабая	средняя	сильная
Озимая пшеница	85-90	50-60	30-35
Озимая рожь	85-90	55-65	35-40
Яровая пшеница	70-80	40-50	15-20
Яровой ячмень	80-85	45-55	30-40
Овес	80-85	55-60	30-45
Кукуруза	80-85	60-70	15-25
Горох, вика	85-95	60-70	50-60
Сахарная свекла, картофель	80-90	30-40	10-15
Подсолнечник	70-80	40-50	20-30
Вика + овес	85-90	65-70	35-45
Суданка	80-90	55-60	30-40
Многолетние травы	90-95	85-90	60-75

Такие культуры, как сахарная свекла, кукуруза, картофель, яровая пшеница, подсолнечник высокотребовательны к условиям произрастания; озимая пшеница, озимая рожь, ячмень, суданка среднетребовательны; многолетние травы, бобовые и вико-овсяная смесь малотребовательны.

Почвозащитная роль сельскохозяйственных культур характеризуется следующими коэффициентами эрозионной опасности: черный пар – 1,00; свекла, кукуруза – 0,85; картофель, подсолнечник – 0,75; яровые зерновые – 0,50; смесь кукурузы с горохом и викой, горох, вика + овес – 0,35; многолетние травы первого года пользования – 0,08, второго года – 0,03, третьего года – 0,01.

Коэффициенты эрозионной опасности показывают, что почва под черным паром и пропашными культурами в наибольшей степени подвергается эрозии. Многолетние травы характеризуются высокой почвозащитной ролью.

С учетом вышеизложенного рекомендуется классификация склоновых земель, в соответствии с которой на территории от водораздела до дна гидрографической сети выделяются 3 земельных фонда (ландшафтные пояса): приводораздельный – ровные участки и пологие склоны, имеющие крутизну до 2° на каштановых и светло-каштановых почвах и 3° на черноземах и темно-каштановых почвах; присетевой – земли крутизной свыше 2-3°, примыкающие к гидрографической сети; гидрографический – берега, крутосклоны (обычно круче 7-8°) и днища лощин, суходолов (балок) и речных долин обычно с малой крутизной (рис. 4.4).

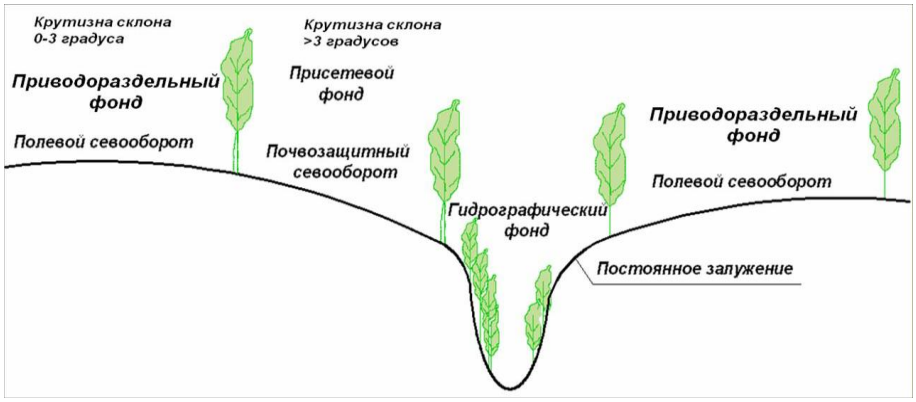


Рис. 4.4. Схема противоэрозионной организации территории

Исходя из вышесказанного, рекомендуется земли на приводораздельных склонах крутизной меньше 2-4° использовать интенсивно в зернопропашных или зернопаропропашных севооборотах с максимальным насыщением парами и пропашными культурами. Земли на присетевых склонах круче 2-4°, где наиболее интенсивно

протекают эрозионные процессы, отводятся под почвозащитные севообороты с максимальным насыщением малотребовательными к условиям произрастания и обладающими высокой почвозащитной способностью многолетними травами. Соотношение культур в севооборотах определяет и структуру посевных площадей. На границе между севооборотами и внутри полей размещаются стокорегулирующие лесные полосы поперек склона или по контуру.

В почвозащитном севообороте многолетние травы надежно защищают почву от эрозии. На зяби, а в ряде случаев и на озимых смыв почвы был значительным. При наличии стокорегулирующей лесополосы на границе полей зернопаропропашного и почвозащитного севооборотов талая вода с вышележащего поля не поступала на нижележащее и смыв в почвозащитном севообороте не увеличивался. При отсутствии лесополосы смыв обычно (такова закономерность) вниз по склону увеличивается. После распашки многолетних трав и если нет подтока смыв бывает незначительный или совсем не проявляется.

Роль почвозащитных севооборотов нами изучалась во взаимодействии с другими факторами: стокорегулирующими лесными полосами в сочетании с простейшими гидротехническими сооружениями и обработкой почвы [63]. В результате наших исследований получены материалы, свидетельствующие о высокой противоэрозионной и агрономической эффективности почвозащитных севооборотов, что позволяет их рекомендовать для практического применения.

Разрабатываемые системы адаптивно-ландшафтного земледелия, основанные на изложенных выше принципах и подходах, позволяют зарегулировать поверхностный сток, улучшить гидротермический режим, подавить эрозионные процессы, повысить экологическое разнообразие агролесоландшафтов, улучшить регуляторную способность агроценозов. Защитные лесные насаждения в системе адаптивно-ландшафтного земледелия кроме того служат долговременными рубежами землепользований, севооборотов, полей. Они выполняют рекреационную, эстетическую и другие социальные функции.

В результате применения адаптивно-ландшафтных систем земледелия уменьшается интенсивность деградационных процессов или в ряде случаев происходит их полная ликвидация; восстанавливается устойчивый гидрологический режим местности;

прекращается или уменьшается до допустимых размеров эрозия и дефляция; повышается влагообеспеченность территории и улучшаются условия произрастания сельскохозяйственных растений; повышается и восстанавливается плодородие почв; увеличивается урожайность; улучшается биоразнообразие, санитарно-гигиеническая обстановка, качество жизни и работы населения; снижается уровень заболеваемости; происходит радикальное оздоровление среды обитания человека и животных.

4.4.2. Технология агролесомелиоративного адаптивно-ландшафтного обустройства территории

Технология агролесомелиоративного адаптивно-ландшафтного обустройства территории создана на основе разработок Е. А. Гаршинёва о функции формы склона как функции эрозии и аккумуляции [40]. Адаптивно-ландшафтное обустройство осуществляется в несколько этапов: расчет стока и смыва талых вод, расчет расстояний между стокорегулирующими лесополосами и другими рубежами, определение параметров проектируемых лесополос (подбор конструкции, рядность, породный состав).

Перед началом проектирования линейных рубежей (лесополос и гидротехнических устройств) проводится обследование территории, анализ топографической и почвенно-эрозионной карт, а также сведений о структуре посевных площадей и севооборотов, осуществляется анализ космоснимков на наличие процессов смыва почв и выявление очагов деградации в целом и др.

Расчет стока талых вод и смыва почвы

Для планирования мер по регулированию поверхностного стока и при проектировании системы противоэрозионных мероприятий на расчетной основе необходима количественная оценка слоя стока в любой точке территории страны. В связи с тем, что в РФ пунктов наблюдений за стоком талых вод на различных видах пашни (зябь, озимые, многолетние травы, стерня и др.) с относительно длинными рядами мало, то наиболее удобной и доступной формой изложения их для проектных организаций являются карты среднего стока и модульные коэффициенты для расчета стока разной вероятности превышения.

Нами совместно с Е. А. Гаршинёвым [40, 63] построены карты среднего весеннего стока с рыхлой и уплотненной пашни для лесостепных и степных районов европейской части РФ (рис. 4.5) по фактическим данным, полученным на стоковых площадках и обобщенным нами по девяти пунктам: серые лесные почвы Орловской обл., темно-серые лесные почвы и выщелоченные черноземы Курской обл., обыкновенные черноземы Воронежской и Самарской обл., южные черноземы и темно-каштановые почвы Саратовской обл., каштановые и светло-каштановые почвы Волгоградской обл., североприазовские черноземы Ростовской обл. Кроме того, использовались материалы по Чувашии, Татарстану, Московской, Кировской, Ульяновской, Тамбовской, Нижегородской и Новгородской областям.

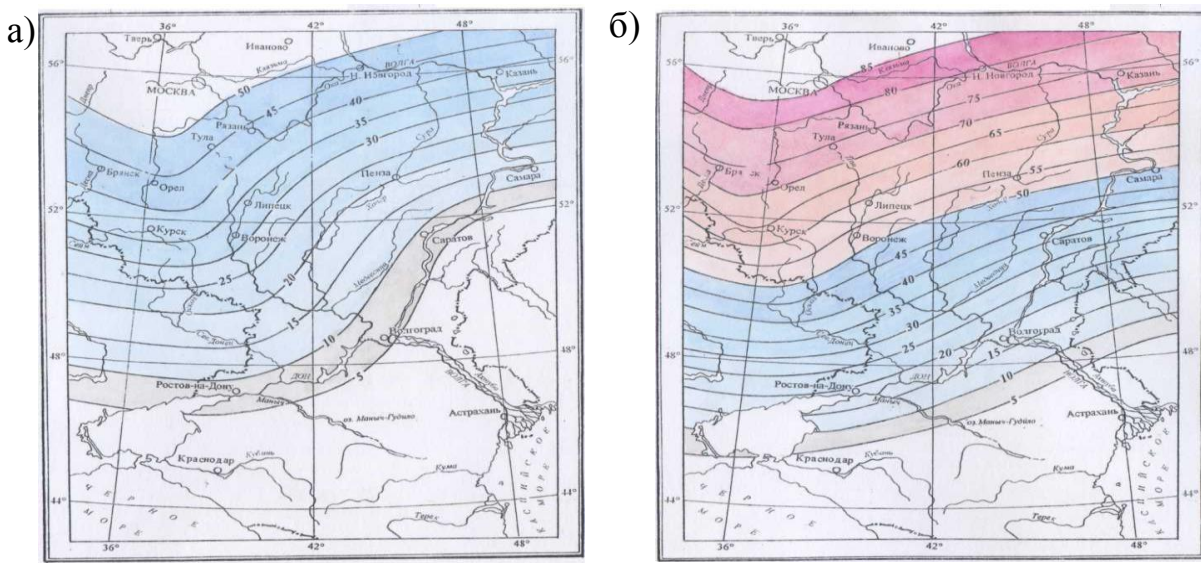


Рис. 4.5. Изолинейные карты поверхностного стока талых вод на рыхлой (а) и уплотненной (б) пашне в европейской части РФ

Карты среднего весеннего стока отражают фактическую картину изменения его в связи с природными и антропогенными факторами в лесостепных районах европейской территории РФ [63].

Проведенный выше анализ данных (см. в разделе 3.2.1) показал, что, в связи с удлинением рядов наблюдений за стоком, средние величины его и показатели разной вероятности превышения изменились. Поэтому изменились и модульные коэффициенты. Используя новые модульные коэффициенты (табл. 4.2) и карты изолиний среднего поверхностного стока талых вод (см. рис. 4.5), можно рассчитывать показатели стока различной вероятности превышения и

применять их при проектировании системы мероприятий по управлению эрозионно-гидрологическим процессом.

Таблица 4.2

Модульные коэффициенты перехода от среднего стока к стоку разной вероятности превышения

Зона, область, почва	Вид пашни	Вероятность превышения, %						
		1	5	10	50	70	80	90
Лесостепная, Орловская, серая лесная	Уплотненная	5,38	3,48	2,69	0,65	0,17	0	0
	Рыхлая	6,45	4,05	2,95	0,55	0	0	0
Лесостепная, Курская, темно-серая лесная	Уплотненная	4,57	3,11	2,46	0,76	0,32	0,11	0
	Рыхлая	5,90	3,70	2,75	0,55	0,10	0	0
Лесостепная, Курская, выщелоченный чернозем	Уплотненная	6,00	3,48	2,91	0,62	0,06	0	0
	Рыхлая	7,54	4,69	3,38	0,46	0	0	0
Степная, Воронежская, обыкновенный чернозем	Уплотненная	5,41	3,52	2,69	0,65	0,17	0	0
	Рыхлая	9,78	5,89	4,22	0,33	0	0	0
Степная, Самарская, обыкновенный чернозем	Уплотненная	3,65	2,68	2,20	0,88	0,47	0,26	0
	Рыхлая	7,71	4,71	3,43	0,43	0	0	0
Степная, Волгоградская, темно-каштановая	Уплотненная	5,25	3,44	2,62	0,83	0,31	0,12	0
	Рыхлая	7,40	4,20	3,00	0,40	0	0	0
Степная, Волгоградская, светло-каштановая	Уплотненная	4,69	3,25	2,56	0,75	0,25	0	0
	Рыхлая	12,67	6,67	4,00	0	0	0	0

Таким образом, используя разработанные нами карты поверхностного стока с рыхлой и уплотненной пашни, можно получить для любой точки европейской части РФ средние величины стока и разной вероятности превышения и использовать их при расчетах расстояний между лесополосами и другими линейными рубежами, в различных гидрологических расчетах и т. д.

Для расчета смыва почв на топографической карте наносятся основные линии тока (рис. 4.6), по которым рассчитываются характеристики формы склонов и значения уклонов и смыва почвы (табл. 4.3), при этом составляется ряд тематических карт (рис. 4.7).

Расчет смыва почв W производят по формуле [40]

$$W = \alpha \cdot K \cdot h^s \cdot I, \qquad (55)$$

где α – коэффициент размерности и пропорциональности (табличное значение для разных видов угодий); K – произведение коэффициентов, учитывающих влияние на смыв почвенных условий (тип почвы, гранулометрический состав, степень смытости), агротехнических приемов и др.; s = 0,95 – параметр; h – слой стока (см. в разделе 1.1); I – уклон.

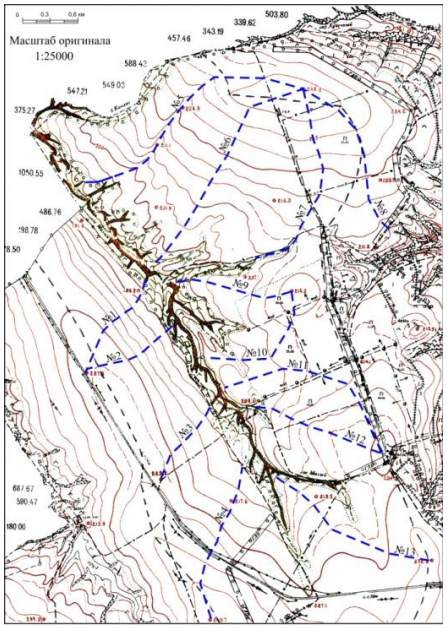


Рис. 4.6. Пример построения линий тока на водосборе лога Малый Клетского р-на Волгоградской обл.

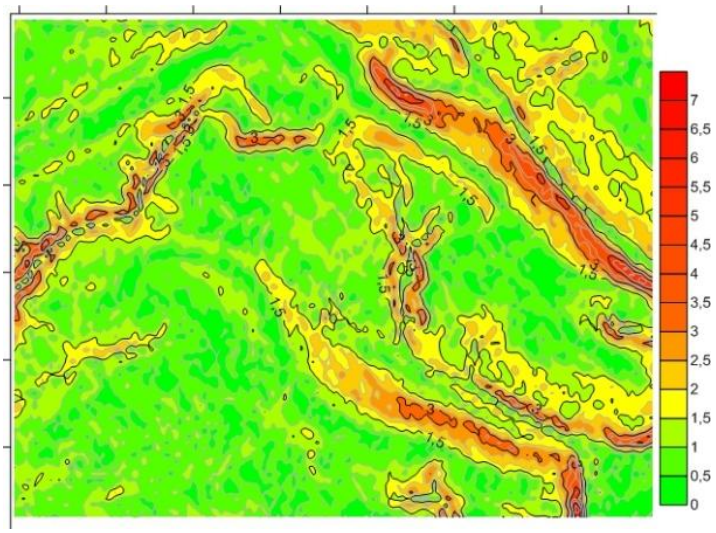


Рис. 4.7. Пример составления карт уклонов

Таблица 4.3

Характеристика склонов водосбора лога Малый по уклонам и смыву почвы на разном расстоянии от водораздела (фрагмент)

Расстояние от водораздела, м	Уклон		Смыв почвы, т/га	Расстояние от водораздела, м	Уклон		Смыв почвы, т/га
	tgI x 10^{+3}	I, град.			tgI x 10^{+3}	I, град.	
профиль 1				*профиль 2*			
250	6,2	0,4	0,1	250	3,2	0,2	0,1
500	5,0	0,3	0,1	500	8,0	0,5	0,1
750	50,0	2,9	2,3	750	50,0	2,9	2,3
1000	67,0	3,8	4,7	1000	44,0	2,6	2,5
1250	40,0	2,3	2,7				

Расчет расстояний между стокорегулирующими лесными полосами и другими рубежами

Положение стокорегулирующих лесных полос (рубежей) на склоне определяется следующими условиями [12]:

величина текущего смыва не должна превышать некоторого допустимого предела – допустимого смыва $W_Д$;

около каждой стокорегулирующей лесополосы формируется вдоль верхней и нижней опушек так называемый пояс восстановления плодородия почвы суммарной шириной $L_в$, равной 90 м;

сток и смыв всякий раз прерывается на рубеже лесополосы вследствие устройства в ней гидротехнического сооружения, которое часть стекающей воды поглощает, а часть отводит вдоль лесополосы;

если величина текущего смыва не достигает $W_Д$ при расстояниях между лесополосами $L_р$, принятыми для "равнинных" условий ($L_р$ = 400 м), то расстояние между лесополосами $L_{мп}$ определяется из неравенства $L_р \geq L_{мп} \geq L_с$, где $L_с = L_р(1 + 3\text{tg}I)$;

из-за уменьшения дальности ветроломного влияния лесных полос на ветроударных склонах $L_{мп} = L_с$.

Во всех случаях, разумеется, $L_{мп} = (L_Д + L_в) \leq (L_р - L_в)$ для первой стокорегулирующей лесополосы от водораздела, если $L_Д \geq L_р$, величина $1/2L_{мп} = 1/2(L_р - 1/2L_в)$. Это означает, что на водораздеде лесная полоса не создается, а вместо нее проектируются две приводораздельные лесополосы по обе стороны водораздела так, что расстояние $L_{мп}$ между ними в сумме равно расстоянию $L_р$ для ветроломных лесополос на "равнине", поскольку при малой крутизне приводораздельных склонов смыв не достигает предельных значений, а малые значения уклона и водораздела на дальности ветроломного влияния не сказываются [12, 81].

Таким образом, расчет стокорегулирующих лесополос выполняется по уравнению связи текущего смыва со слоем стока, характеристиками формы склона и коэффициентами почвенных условий до тех пор, пока расстояние до первой от водораздела лесополосы не станет равным $1/2L_р$ или величина смыва на некотором расстоянии $L_Д \leq 1/2(L_р - L_в)$ не достигнет предельно допустимого размера. Положение нижележащей 2-й стокорегулирующей лесной полосы получают расчетом от точки, расположенной на расстоянии от водораздела $L_2 = L_Д + L_п + 1/2L_в$ и т. д. до бровки

лощинно-балочной сети, где L_n – ширина лесополосы.

Трассирование стокорегулирующих лесных полос осуществляется:

параллельно-прямолинейно – на склонах с прямым поперечным профилем;

параллельно контурно-прямолинейно – на склонах собирающего и рассеивающего типов с равномерным расстоянием между горизонталями;

параллельно-контурно – на склонах собирающего и рассеивающего типа с равномерным расстоянием между горизонталями;

контурно-параллельно со спрямлением в ложбинах на склонах с неравномерным расстоянием между горизонталями.

При проектировании стокорегулирующих лесных полос необходимо стремиться к их параллельности. При этом контурность (кривизна) лесных полос, если они являются направляющими линиями обработки, проектируются так, чтобы начав обработку от лесных полос, радиусы загонов на всем участке были бы не менее 60-70 м.

Во ВНИАЛМИ разработаны типовые проектные решения комплекса мероприятий по адаптивно-ландшафтному обустройству территории в хозяйствах Волгоградской обл. На рис. 4.8 приведена схема противоэрозионной организации территории и размещения стокорегулирующих лесных полос крупного балочного водосбора. Земли принадлежат двум фермерам. С учетом изложенных выше принципов и подходов у каждого фермера были организованы по 2 севооборота: на склонах крутизной до 3° зерно-паропропашной (светлый тон на рисунке), а свыше 3° – травопольный (почвозащитный; темный тон). По границам полей и внутри их запроектированы стокорегулирующие лесные полосы, размещенные контурно-прямолинейно. В рамках этой организации территории разработана структура посевных площадей, схемы севооборотов, почвозащитные технологии возделывания сельскохозяйственных культур, система удобрений, система машин; определено место и объемы применения лугомелиоративных и гидротехнических мероприятий.

На рис. 4.9 приведена схема размещения зернопаропропашного и почвозащитного севооборотов на водосборах землепользования ИП Исаев Серафимовичского р-на. Здесь крутизна скло-

нов в основном меньше 3° и под почвозащитный севооборот отведена небольшая площадь.

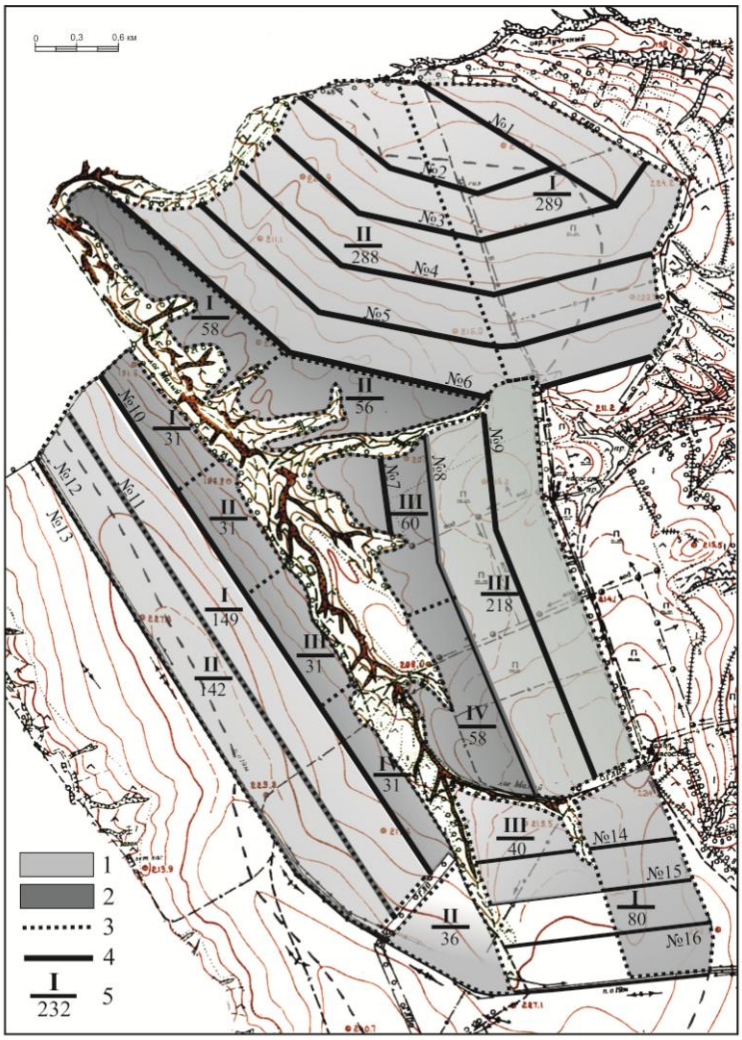


Рис. 4.8. Схема адаптивно-ландшафтного обустройства территории водосбора в Клетском р-не (1 – полевые севообороты, 2 – почвозащитные севообороты, 3 – границы полей, 4 – проектируемые лесополосы, 5 – номера и площади полей)

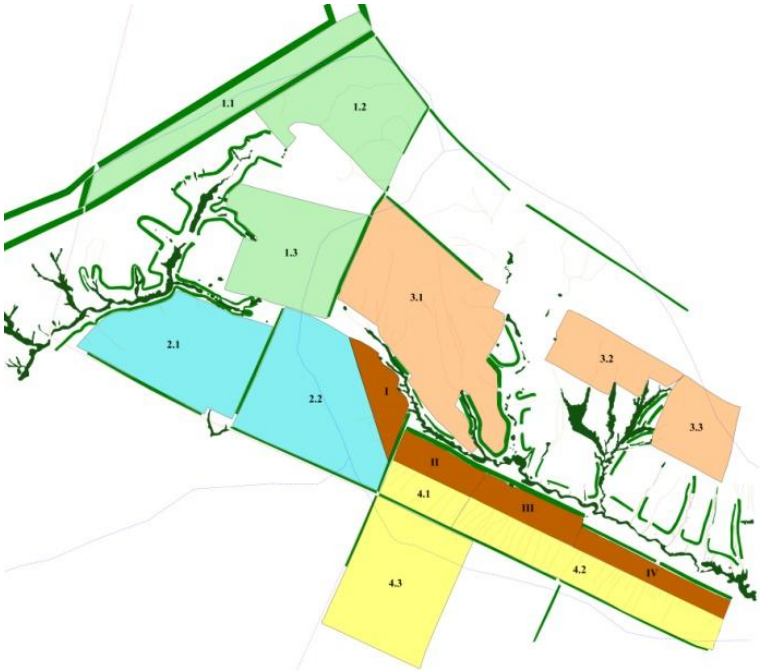


Рис. 4.9. Схема размещения севооборотов на водосборах ИП Исаев Серафимовичского р-на (1 – поля зернопаропропашного севооборота, 2 – поля почвозащитного севооборота)

Назначение параметров проектируемых лесных полос

При определении лесоводственно-мелиоративных параметров проектируемых лесополос необходимо руководствоваться следующими положениями:

функциональное назначение лесных полос на склонах заключается в сочетании главным образом стокорегулирующих, почвозащитных и ветроломных функций. При этом ветроломные функции хотя и играют вспомогательную роль, обеспечивая агроэкономическую эффективность лесополос, их использование важно в первую очередь в противоэрозионно-гидрологическом плане [9];

главное функциональное назначение стокорегулирующих и прибалочных лесополос – поглощение вод поверхностного стока и защита почв от эрозии – определяется сочетанием их с гидротехническими сооружениями. Ветроломные их функции определяются конструкцией лесополос, которая зависит от числа рядов, породного состава, схемы смешения и размещения пород.

Конструкции лесополос должны быть дифференцированы в зависимости от назначения, места расположения на склоне, крутизны склонов и др. Многими поколениями ученых агролесомелиораторов разработаны 3 основные конструкции: плотная, ажурная, продуваемая – и переходные: умеренно-ажурная, ажурно-продуваемая, ажурно-плотная.

Выполняя свои функции, лесополосы способствуют распределению снега по полям и накоплению внутри себя достаточного его количества, необходимого для дополнительного увлажнения и предотвращения почвы от промерзания. Таким требованиям отвечает разработанная и апробированная нами еще одна конструкция лесополос – комбинированная [121]. Она обеспечивает оптимальное снегоотложение, предохраняющее почву от промерзания, сохраняющее на высоком уровне впитывающую и кольматирующую способность, а также дополнительное накопление влаги для деревьев (см. в разделе 3.4).

Важную роль играют способы размещения стокорегулирующих лесополос разных конструкций на склонах. Известно, что лесные полосы, задерживая и перераспределяя на местности снег, обусловливают повышенное водопоглощение в самих лесных полосах и зонах отложения снежных шлейфов, что способствует снижению стока и эрозии почв. Однако лесополосы не обес-

печивают равномерного его стаивания весной, что приводит к увеличению смыва почвы в межшлейфовой части межполосного пространства. Необходимо регулировать снегоотложение так, чтобы мощность снежного покрова возрастала сверху вниз по склону. Для обеспечения такого снегоотложения лесные полосы необходимо создавать с уменьшающейся ветропроницаемостью сверху вниз по склону. Это достигается созданием лесополос разной конструкции: первую от водораздела двухрядную приводораздельную полосу продуваемой конструкции закладывают без кустарника из пород, обеспечивающих площадь просветов между стволами свыше 60 %, в кронах до 10 %. Вторую, стокорегулирующую полосу из трех рядов формируют без кустарников ажурно-продуваемой конструкции, занимающей промежуточное положение между ажурными и продуваемыми по площади просветов между стволами и в кронах (12-45 %). Третью, стокорегулирующую лесополосу из трех рядов ажурной конструкции формируют из древесных пород и кустарников (в двух рядах главные породы, в третьем – главные чередуются с кустарником), обеспечивающих ветропроницаемость между стволами и в кронах 15-35 %. Четвертую, стокорегулирующую лесополосу создают из трех-четырех рядов, но один ряд из чистого кустарника. Пятую, прибалочную полосу, создают пятирядную плотной конструкции из деревьев и кустарников: 3 ряда из главных пород, 2 – из кустарников. Лесополоса должна быть с ветропроницаемостью по всему профилю максимально допустимо не более 10 %. Для лучшего снегораспределения в межшлейфовых участках межполосного пространства можно высевать кулисы из высокостебельных сельскохозяйственных культур. При таком сочетании посадки лесных полос и кулис из сельскохозяйственных растений почти весь выпавший снег откладывается на полях равномерно с увеличением мощности его сверху вниз, что обусловливает постепенное стаивание его в этом же направлении и резкое сокращение смыва почвы или предотвращение его (см. в разделе 3.5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эрозия почв является результатом сложного взаимодействия воды и почвы под влиянием природных и антропогенных факторов. К природным факторам относятся осадки, глубина промерзания, степень и характер увлажнения, водно-физические и химические свойства почвы, рельеф местности, характер снегоотложения и снеготаяния и др., к антропогенным – хозяйственная деятельность людей (обработка почвы, создание лесных полос, травосеяние, размещение сельскохозяйственных культур и др.). Эти факторы влияют как на усиление эрозии, так и ее ослабление.

Использование статистических и генетических методов исследования и анализа полученного материала, а также применение элементов системного подхода позволили разработать новые теоретические положения формирования поверхностного стока талых вод, существенно уточняющие представления о физической природе гидрологических процессов на сельскохозяйственных угодьях, по-новому трактовать условия просачивания талых вод в почву, усовершенствовать существующие и разработать новые математические модели, установить связь поверхностного стока с природными факторами при различном антропогенном воздействии, дать оценку стокорегулирующей, противоэрозионной и агрономической эффективности отдельных почвозащитных приемов и их сочетаний, определить роль и место агролесомелиорации в адаптивно-ландшафтном земледелии, предложить систему эффективных мер по защите почв от эрозии и технологию управления эрозионно-гидрологическим процессом.

Эти материалы необходимы для проведения гидрологических и эрозионных расчетов и прогнозов весенних паводков на малых и средних реках, при проектировании противоэрозионных адаптивно-ландшафтных систем земледелия и дальнейшего совершенствования адаптивно-ландшафтного природопользования. Теоретические разработки позволяют получить более правильное представление об эрозионно-гидрологических процессах. Их можно применять при обосновании элементов противоэрозионного комплекса,

их сочетаний и более обоснованно рассчитывать адаптивно-ландшафтную систему земледелия в целом. Они могут служить теоретической и нормативной базой при разработке системы управления эрозионно-гидрологическим процессом на расчетной основе для обустройства комплексных балочных и малых речных бассейновых агроэколандшафтов как эрозионно-безопасных и экологически сбалансированных объектов. Они также могут быть использованы в учебных пособиях для преподавания в высших и средних учебных заведениях курса по защите почв от эрозии.

Теоретический анализ влияния природных факторов на формирование стока на основе богатейшего экспериментального материала, полученного в течение 50-68 лет на семи стационарах в европейской части РФ, позволил выявить закономерности его формирования на различных видах пашни, определить показатели среднего и разной вероятности превышения стока и стокорегулирующей эффективности зяблевой обработки в лесостепной, степной и полупустынной зонах. Приведенные материалы исследований дают представление о закономерностях и особенностях его формирования в разных географических зонах и методах воздействия и управления ими через применение почвозащитных ресурсов влагосберегающих технологий и средств агролесомелиорации.

Распределение стока талых вод по территории обусловлено зональными климатическими (природными) факторами (снегозапасы, увлажнение и глубина промерзания почвы) и видом хозяйственной деятельности (соотношение сельскохозяйственных угодий, структура посевных площадей, используемые севообороты, обработка почвы, применяемые почвозащитные мероприятия и др.). Изменение влияния природных факторов на сток происходит при движении от лесостепи к степи и полупустыне. Главные изменения в сельскохозяйственной деятельности в последние два десятилетия связаны с трансформацией структуры посевных площадей и характера обработки почвы, что привело к значительному изменению соотношения уплотненной и рыхлой пашни, а именно к сокращению площадей с зяблевой обработкой почвы. Средняя многолетняя величина стока варьирует на рыхлой пашне в интервале от 15-20 мм в лесостепи до 3-7 в степи и соответственно от 30-37 до 15-34 мм на уплотненной пашне.

Ход динамики весеннего стока показывает, что он в значительной степени колеблется по годам и явно наблюдается тенден-

ция его устойчивого снижения от 1959 к 1996 г., а в последние почти 20 лет его совсем не было, что связано в основном с климатическими изменениями. Наибольшая амплитуда колебаний стока наблюдается на угодьях с уплотненной пашней в более увлажненных северных районах лесостепи, где она достигает 186 мм на уплотненной пашне и 146 на рыхлой, а наименьшая – в засушливых южных степных районах – 58 мм на уплотненной пашне и 36 на рыхлой. Характерной особенностью последних десятилетий является значительное увеличение водопоглощения талых вод – в среднем на 25-45 %.

Выявлено разнонаправленное влияние природных и антропогенных факторов на формирование поверхностного стока. Природные факторы влияют на его уменьшение, а антропогенные – на повышение в связи с уменьшением в последние десятилетия площадей под рыхлой пашней. Причем снижение стока под влиянием природных факторов в несколько раз превышает его увеличение в результате уменьшения площадей под рыхлой пашней.

Знание закономерностей формирования поверхностного стока талых вод позволило открыть *закон лимитирующих факторов*. Суть его заключается в том, что при определенном лимитирующем уровне одного из трех факторов (снегозапасы, глубина промерзания, влажность почвы) поверхностный сток не формируется независимо от уровня двух других. Установлены уровни факторов, при которых сток не формируется. На его основе разработан метод прогноза стока талых вод, который получил многолетнюю апробацию в разных природных зонах. Он позволяет с высокой точностью прогнозировать поверхностный сток талых вод с сельскохозяйственных угодий. Имея высокоточный прогноз поверхностного стока талых вод в Волжском бассейне и большие запасы воды в водохранилищах, можно в любой по водности год устанавливать оптимальный режим весеннего попуска воды.

Фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать важный вывод о том, что при совершенствовании стокорегулирующих приемов и создании новых необходимо исходить из того, как они воздействуют на природные факторы: глубину промерзания, увлажнение почвы и запасы воды в снеге. Зная роль природных факторов в формировании стока и антропогенного воздействия на него, можно регулировать их. В связи с тем, что стокорегулирующие лесные полосы наибо-

лее мощно влияют на природные факторы эрозионно-гидрологического процесса через снегораспределительные функции, на них необходимо воздействовать в первую очередь на основе знания закономерностей снегоотложения. Важнейшим природным фактором является глубина промерзания почвы, которую можно регулировать путем воздействия на характер снегоотложения с помощью стокорегулирующих лесных полос.

Нами разработаны и апробированы новые приемы регулирования снегоотложения в системе защитных лесных насаждений. Стокорегулирующие лесные полосы комбинированной конструкции с низкорослым кустарником обеспечивают оптимальное снегоотложение. Система лесополос с уменьшающейся сверху вниз по склону ветропроницаемостью способствует равномерному распределению снега с небольшим увеличением его мощности к нижней части склона, что обусловливает предотвращение смыва почвы. Эффективными в снегонакоплении и снижении глубины промерзания почвы являются кулисы из высокостебельных сельскохозяйственных растений в межполосном пространстве стокорегулирующих лесополос. Эти приемы высокоэффективны потому, что они мощно воздействуют на природные факторы стока талых вод.

На основе выявленных закономерностей формирования поверхностного стока талых вод и оценки всех способов и приемов управления эрозионно-гидрологическим процессом установлены наиболее перспективные. Ими могут быть приемы, направленные на регулирование поверхностного стока путем потускулярного перевода его в грунтовый (лесные полосы, водозадерживающие валы и канавы и др.); безопасный сброс по поверхности (наклонные водоотводящие борозды, распылители стока, водоотводящие валы и др.); повышение противоэрозионной устойчивости почв (минимизация обработки, плоскорезная обработка, использование многолетних трав для улучшения структуры почв и др.); использование почвозащитных свойств растительности (почвозащитные севообороты, постоянное залужение сильноэродированных участков, совершенствование структуры посевных площадей и др.).

В силу указанных обстоятельств стратегия противоэрозионной мелиорации должна исходить из того, что необходимый стокорегулирующий эффект, способный практически возродить ситуацию естественного эрозионно-гидрологического режима в деградированных агроландшафтах, может обеспечить лишь искус-

ственно создаваемая система контурных стокорегулирующих и противоэрозионных рубежей – в первую очередь, лесных полос в сочетании с гидротехническими приемами, создающих своеобразный каркас на местности. Агротехнические приемы в управлении эрозионно-гидрологическим процессом выполняют лишь ограниченную роль, а применение гидросооружений (валы-террасы) на пашне лимитируется сложностью их создания и эксплуатации. Наиболее перспективными приемами регулирования эрозионно-гидрологического процесса являются лесомелиоративные. Они многофункциональны, долговечны и высокоэффективны и есть возможности их дальнейшего совершенствования.

Таким образом, знание закономерностей формирования поверхностного стока талых вод позволяет целенаправленно строить системы адаптивно-ландшафтного земледелия и управлять эрозионно-гидрологическим процессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Докучаев В. В. Сочинения: в 9 т. – Т. 6: Преобразование природы степей. Наши степи прежде и теперь. – М. – Л.: АН СССР, 1951. – С. 11-102.

2. Козменко А. С. Борьба с эрозией почв. – М.: Сельхозгиз, 1954. – 229 с.

3. Козменко А. С., Ивановский А. Д. Режим поверхностного стока в центральной лесостепи // Гидротехника и мелиорация. – 1953. – № 1. – С. 3-18.

4. Соболев С. С. Развитие эрозионных процессов на территории европейской части СССР и борьба с ними: в 2 т. – Т. 1. – М. – Л.: АН СССР, 1948. – 305 с.

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

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

7. Кузник И. А. Агролесомелиоративные мероприятия, весенний сток и эрозия почв. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 220 с.

8. Заславский М. Н. Эрозиоведение. – М.: Высшая школа, 1983. – 320 с.

9. Сильвестров С. И. Эрозия и севообороты. – М.: Сельхозгиз, 1949. – 142 с.

10. Мирцхулава Ц. Е. Инженерный прогноз и меры по предотвращению водной эрозии почв // Гидротехника и мелиорация. – 1978. – № 7. – С. 73-76.

11. Борец В. П. Водорегулирующая и противоэрозионная роль лесных насаждений на серых лесных почвах юга Нечерноземья // Лесомелиорация склонов: сб. науч. тр. ВНИАЛМИ. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1985. – Вып. 3(86). – С. 125-132.

12. Гаршинёв Е. А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: экспериментальная оценка, расчет, проектирование. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2002. – 220 с.

13. Здоровцов И. П. Почвоводоохранное устройство территории севооборотов // Науч.-техн. бюл. ВНИИЗиЗПЭ. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 1985. – Вып. 1(44). – С. 3-18.

14. Зыков И. Г., Ивонин В. М., Духнов В. К. Защита склонов от эрозии. – М.: Россельхозиздат, 1985. – 174 с.

15. Бондаренко Ю. В., Зыков И. Г. Водорегулирующая эффективность полосных лесных насаждений различных параметров в гидрографической сети // Вопросы защиты почв от эрозии: бюл. ВНИАЛМИ. – Волгоград, 1978. – Вып. 2(27). – С. 21-22.

16. Проездов П. Н., Вишнякова В. В. Водный баланс агролесоландшафтов. – М.: Планета, 2015. – 132 с.

17. Проездов П. Н., Маштаков Д. А., Давыдова Е. Г. Влияние лесных и гидротехнических мелиораций на влагозапасы в зоне аэраций степных ландшафтов Приволжской возвышенности // Агролесомелиорация в сис-

теме адаптивно-ландшафтного земледелия: поиск новой модели (к 90-летию академика РАСХН Е. С. Павловского): материалы Международ. науч.-практ. конф. аспирантов и молодых ученых, Волгоград, 25-28 нояб. 2013 г. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2013. – С. 190-194.

18. Шабаев А. И. Сток талых вод, эрозия почв и особенности построения почвозащитных систем в агроландшафтах Поволжья // Теория и практика агролесомелиорации: материалы Международ. науч.-практ. конф., посвященной 125-летию со дня рождения Н. И. Суса, Саратов, 6-8 сент. 2005 г. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2005. – С. 223-235.

19. Сурмач Г. П. Об условиях, определяющих поглощение почвой талых вод // Земледелие. – 1955. – № 1. – С. 8-12.

20. Сурмач Г. П. Борьба с эрозией почв на основе учета поверхностного стока // Вестник с.-х. науки. – 1962. – № 8. – С. 81-90.

21. Сурмач Г. П. О влиянии микрорельефа поверхности и глубины зяблевой пахоты на сток талых вод // Почвоведение. – 1965. – № 6. – С. 103-113.

22. Изучение водопоглощающего и противоэрозионного влияния защитных лесонасаждений в комплексе с другими мероприятиями / Г. П. Сурмач [и др.] // Методические рекомендации. – М.: ВАСХНИЛ, ВНИАЛМИ, 1975. – 96 с.

23. Методические рекомендации по проектированию комплекса противоэрозионных мероприятий для проектов внутрихозяйственного землеустройства колхозов и совхозов Курской области, входящих в зону крупномасштабного эксперимента / Д. Е. Ванин [и др.]. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 1978. – 179 с.

24. Корреляционно-регрессионный анализ в противоэрозионной лесомелиорации с применением программируемых микрокалькуляторов / И. Г. Зыков [и др.] // Методические рекомендации с примерами решения задач. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1986. – 103 с.

25. Барабанов А. Т., Гаршинёв Е. А. Методика изучения способов сочетания лесомелиорации с другими элементами систем земледелия при контурной организации территории. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1987. – 44 с.

26. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

27. Зайцев Г. Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. – М.: Наука, 1984. – 424 с.

28. Мельников С. В., Алешкин В. О., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – М.: Колос, 1972. – 221 с.

29. Литтл Т., Хиллз Ф. Сельскохозяйственное опытное дело. Планирование и анализ / пер. с англ. – М.: Колос, 1981. – 319 с.

30. Перегудов В. Н. Планирование многофакторных полевых опытов с удобрениями и математическая обработка их результатов. – М.: Колос, 1978. – 182 с.

31. Протодьяконов М. И., Тедер Р. И. Методика рационального планирования эксперимента. – М.: Наука, 1970. – 75 с.

32. Сурмач Г. П. Методика изучения водорегулирующей и противо-

эрозионной эффективности лесных полос и агротехнических приемов. – Волгоград, 1967. – 39 с.

33. Кинг Л. Морфология земли / пер. с англ. – М.: Прогресс, 1967. – 560 с.

34. Сурмач Г. П. О влиянии искусственного уплотнения снега на скорость снеготаяния // Сб. науч.-исслед. работ Клетского опорного пункта. – Волгоград, 1964. – Вып. 47. – С. 45-50.

35. Гончар А. И. Почвозащитный метод обработки почвы // Земледелие. – 1958. – № 8. – С. 8-12.

36. Грин А. М. Динамика водного баланса Центрально-Черноземного района. – М.: Наука, 1965. – 146 с.

37. Коронкевич Н. И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. – М.: Наука, 1990. – 205 с.

38. Барабанов А. Т. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод, его прогноз и регулирование // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 1(33). – С. 65-68.

39. 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.

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

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

42. Долгов С. В., Коронкевич Н. И. Особенности реакции рек Русской равнины на изменение температуры воздуха // Изв. РАН. Сер.: География. – 2012. – № 6. – С. 55-62.

43. Коронкевич Н. И., Мельник К. С. Гидрологические последствия изменения землепользования в бассейне реки Москвы // Изв. РАН. Сер.: География. – 2015. – № 5. – С. 38-45.

44. Панов В. И. Водный баланс и эрозия на черноземах степного Заволжья: автореф. дис. … к. г. н. – М., 1975. – 31 с.

45. Сурмач Г. П. Влияние агротехники на сток талых вод и смыв светло-каштановых почв // Вестник с.-х. науки. – 1968. – № 2. – С. 13-19.

46. Сурмач Г. П., Барабанов А. Т. О противоэрозионной роли почвозащитного севооборота на серых лесных почвах в лесостепи // Эрозия почв и почвозащитное земледелие: науч. тр. ВАСХНИЛ / Отв. ред. Н. К. Шикула. – М.: Колос. – 1975. – С. 173-176.

47. Сурмач Г. П. О распределении влаги в светло-каштановой почве с неоднородным механическим составом при различной осенней ее обработке // Вопросы почвенной гидрологии и приемы защиты почв от водной эрозии: сб. науч. тр. ВНИАЛМИ. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1970. – Вып. 1(61). – С. 14-21.

48. К оценке методов изучения увлажнительной роли противоэрозионных приемов / Г. П. Сурмач [и др.] // Защита почв от эрозии: науч.-техн. бюл. – Курск, 1976. – Вып. 6. – С. 11-16.

49. Скачков И. А., Трегубов П. С. Эффективность агротехнических приемов на склонах в системе докучаевских лесополос // Борьба с эрозией почв / Сост. чл.-кор. ВАСХНИЛ И. А. Скачков. – М.: Россельхозиздат, 1968. – С. 35-40.

50. Коваленко А. П. Щелевая обработка почвы как прием борьбы с водной эрозией на посевах озимых: автореф. дис. … к. с.-х. н. – Воронеж, 1969. – 24 с.

51. Стариченко П. А. Противоэрозионная обработка зяби серых лесных почв на склоновых землях Курской области: автореф. дис. … к. с.-х. н. – М., 1969. – 24 с.

52. Черенев Г. А. Эффективность противоэрозионных обработок темно-серых лесных эродированных почв (Московская область): автореф. дис. … к. с.-х. н. – М., 1972. – 23 с.

53. Гаршинёв Е. А. Противоэрозионная лесомелиорация и эволюция эрозионно-гидрологического процесса: автореф. дис. … д. с.-х. н. – Волгоград, ВНИАЛМИ. – 1995. – 48 с.

54. Рожков А. Г. К вопросу об учете стока воды и смыва почвы // Комплекс противоэрозионных мероприятий в действии: сб. науч. тр. УкрНИИЗПЭ. – Т. 2. – Ворошиловград: УкрНИИЗПЭ, 1985. – С. 5-6.

55. Дьяков В. Н. К вопросу об учете смыва почв // Там же. – С. 17-18.

56. Шелякин Н. М. Проблема учета стока воды и смыва почвы при изучении эрозионных процессов // Там же. – С. 25-26.

57. Герасименко В. П., Буруменский В. С. Методика оценки стокорегулирующей эффективности агротехнических противоэрозионных приемов // Вестник с.-х. науки. – 1981. – № 12. – С. 50-56.

58. Сурмач Г. П. Методика изучения водорегулирующей и противоэрозионной эффективности лесных полос и агротехнических приемов. – Волгоград, 1967. – 39 с.

59. Сурмач Г. П. Водорегулирующая и противоэрозионная роль насаждений. – М.: Лесн. пром-сть, 1971. – 109 с.

60. Рожков А. Г. Борьба с оврагами. – М.: Колос, 1981. – 199 с.

61. Ивонин В. М. Агролесомелиорация разрушенных оврагами склонов. – М.: Колос, 1983. – 174 с.

62. Каштанов А. Н., Заславский М. Н. Почвоводоохранное земледелие. – М.: Россельхозиздат, 1984. – 208 с.

63. Барабанов А. Т. Агролесомелиорация в почвозащитном земледелии. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1993. – 156 с.

64. Панов В. И. Воднобалансовые исследования на опытных водосборах с различными ландшафтами в степной зоне Поволжья // Эрозия почв, защитное лесоразведение и урожай. – 1978. – Вып. 9. – С. 68-84.

65. Гаршинёв Е. А., Зарудная Т. Я. Оценка приемов ускоренного повышения водопоглощения в молодых лесонасаждениях на типичных черноземах ЦЧО // Лесомелиорация склонов: сб. науч. тр. ВНИАЛМИ. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1985. – Вып. 3(86). – С. 62-73.

66. Абдульманов Ф. А., Барабанов А. Т. Влияние защитных лесных

полос и обработки почвы на сток, эрозию и урожай в Куйбышевском Заволжье // Защита почв от эрозии: науч.-техн. бюл. ВНИИЗиЗПЭ. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 1977. – Вып. 4(11). – С. 8-12.

67. Демидов В. В. Комплексное влияние лесных полос и агротехнических приемов на эрозию почвы и урожайность сельскохозяйственных культур на черноземах Курской области: автореф. дис. … к. с.-х. н. – Волгоград, 1983. – 25 с.

68. Барабанов А. Т., Гаршинёв Е. А. Оценка весеннего поверхностного стока в степи и лесостепи европейской территории РСФСР, Украины и Белоруссии // Бюл. ВНИАЛМИ. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1987. – Вып. 2(51). – С. 5-9.

69. Докучаев В. В. Способы образования речных долин европейской России. – Спб., 1878. – 222 с.

70. Костычев П. А. Почвы черноземной области России, их происхождение, состав и свойства. – Ч. I: Образование чернозема. – Л.: АН СССР, 1951. – 156 с.

71. Сурмач Г. П. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1992. – 174 с.

72. Докучаев В. В. Овраги, их происхождение и деятельность // Избр. соч. – М.: Сельхозгиз, 1954. – С. 543-560.

73. Соболев С. С. Развитие эрозионных процессов на территории европейской части СССР и борьба с ними: в 2 т. – Т. 2. – М. – Л.: АН СССР, 1960. – 248 с.

74. Арманд Д. Л. Естественный эрозионный процесс // Географическая среда и рациональное использование природных ресурсов: сб. ст. Арманд Д. Л. – М.: Наука, 1983. – С. 56-70.

75. Щукин И. С. Общая геоморфология: в 3 т. – Т. 1. – М.: МГУ, 1960. – 616 с.

76. Зорина Е. Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. – М.: ГЕОС, 2003. – 168 с.

77. Косов Б. Ф. О зональности явлений овражной эрозии европейской части СССР // Почвоведение. – 1960. – № 8. – С. 25-31.

78. Лавренко Е. М., Прозоровский А. В. Растительность европейской части СССР // Почвы СССР: в 3 т. – Т. 1: Условия почвообразования и характеристика главнейших типов почв / Под ред. Л. И. Прасолова. – М. – Л.: АН СССР, 1939. – С. 101-156.

79. Афанасьева Е. А. Черноземы Средне-Русской возвышенности. – М.: Наука, 1966. – 224 с.

80. Большаков А. Ф. Влияние двучленности наносов на водный режим мощных черноземов // Почвоведение. – 1959. – № 7. – С. 31-40.

81. Агролесомелиоративное адаптивно-ландшафтное обустройство водосборов / И. С. Кочетов [и др.]. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. – 83 с.

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

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

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

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

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

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

88. 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.

89. 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.

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

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

92. 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.

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

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

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

96. 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.

97. 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.

98. 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.

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

100. 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.

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

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

103. 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.

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

105. 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.

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

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

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

109. Ломакин М. М. Водозадерживающая и почвозащитная роль мульчирования соломой серых лесных эродированных почв северной лесостепи Центрально-Черноземной зоны: автореф. дис. … к. с.-х. н. – Воронеж, 1980. – 24 с.

110. Порядин В. А. Эффективность щелевания черноземов на склонах лесостепной зоны в целях повышения противоэрозионной устойчивости и продуктивности: автореф. дис. … к. с.-х. н. – Воронеж, 1985. – 22 с.

111. Влияние системы лесополос в зависимости от экспозиции склона на сток талых вод и смыв почвы / А. И. Крупчатников [и др.] // Науч.-техн. бюл. – 1986. – Вып. 3(50). – С. 40-44.

112. Пат. № 2347222 A01B13/16, G01N33/24 Способ прогнозирования поверхностного стока талых вод / Барабанов А. Т. (РФ), Гаршинёв Е. А. (РФ), Кулик К. Н. (РФ); заявитель ГНУ ВНИАЛМИ. – № 2009126879/12; заявл. 24.07.2006; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 3 с.

113. Водный баланс основных экосистем Центральной лесостепи: материалы эксперимент. исслед. / Под ред. А. М. Грина. – М.: Ин-т географии АН СССР , 1974. – 133 с.

114. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.

115. Пынзарю Н. М. К обоснованию параметров противоэрозионных лесных полос в районе Правобережья Нижней Волги // Агролесомелиоратив-

ные основы защиты почв от водной эрозии и рациональное использование эродированных почв. – 1980. – Вып. 3(34). – С. 17-19.

116. Антонов В. И. Особенности формирования поверхностного стока талых вод с малых водосборов сухой степи // Противоэрозионная мелиорация: бюл. ВНИАЛМИ. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1984. – Вып. 2(43). – С. 18-20.

117. Борец В. П., Попов Н. С. Опыт коренной мелиорации размытых земель в колхозе "Красный Октябрь" Камышинского района Волгоградской области // Вопросы защиты почв от эрозии: бюл. ВНИАЛМИ. – Волгоград: ВНИАЛМИ,1978. – Вып. 2(27). – С. 68-70.

118. Барабанов А. Т. Научные основы управления эрозионно-гидрологическим процессом // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. – № 1(33). – С. 33-38.

119. Сурмач Г. П., Гаршинёв Е. А., Барабанов А. Т. О стокорегулирующей эффективности микрорельефа зяби на черноземах Курской области // Защита почв от эрозии: науч.-техн. бюл. ВНИИЗиЗПЭ. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 1977. – Вып. I(12). – С. 32-38.

120. Барабанов А. Т., Гаршинёв Е. А. Эффективность созданных на зяби микронеровностей // Земледелие. – 1983. – № 4. – С. 12-14.

121. Пат. 2248116 C1 РФ A01G23/00, A01B79/02 Способ регулирования снегоотложения для защиты почв от эрозии на склонах / Барабанов А. Т. (РФ), Гаршинев Е. А. (РФ), Кочкарь М. М. (РФ); заявитель ГУ ВНИАЛМИ. – № 2003122810/12; заявл. 21.01.2003; опубл. 20.03.2005, Бюл. № 8. – 3 с.

122. Пат. 1799234 A3 РФ A01B79/02, A01G23/00, A01B13/16 Способ защиты почв от эрозии на склонах / Барабанов А. Т. (РФ), Гаршинёв Е. А. (РФ); заявитель ВНИАЛМИ. – № 4859671/15; заявл. 14.08.90; опубл. 28.02.1993, Бюл. № 8. – 3 с.

123. Тарарико А. Г. Почвозащитные мероприятия на склоновых землях Украины // Почвозащитное земледелие на склонах / Под ред. А. Н. Каштанова. – М.: Колос, 1983. – С. 189-213.

124. Концепция адаптивно-ландшафтного обустройства территории Волгоградской области / К. Н. Кулик [и др.] // Вестник РАСХН. – 2004. – № 1. – С. 53-55.

125. Система адаптивно-ландшафтного земледелия Волгоградской области на период до 2015 года / А. Л. Иванов [и др.]. – Волгоград: ИПК Волгоградской ГСХА "Нива", 2009. – 304 с.

126. Каштанов А. Н., Лисецкий Ф. Н., Швебс Г. И. Основы ландшафтно-экологического земледелия. – М.: Колос, 1994. – 203 с.

127. Энциклопедия агролесомелиорации / Под ред. Е. С. Павловского. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2004. – 679 с.

128. Кирюшин В. И. Концепция адаптивно-ландшафтного земледелия. – Пущино, 1993. – 64 с.

129. Кирюшин В. И. Экологические основы земледелия. – М.: Колос, 1996. – 366 с.

130. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-

ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Методическое руководство / Под ред. В. И. Кирюшина, А. Л. Иванова. – М.: ФГНУ Росинформагротех, 2005. – 784 с.

131. Гаршинёв Е. А. Противоэрозионная лесомелиорация и эволюция эрозионно-гидрологического процесса: автореф. дис. … д. с.-х. н. – Волгоград, 1995. – 48 с.

132. Барабанов А. Т. Теория и практика разработки систем агролесомелиоративных почвозащитных мероприятий в адаптивно-ландшафтном земледелии // Известия Оренбургского ГАУ. – 2014. – № 4(48). – С. 28-31.

133. Кулик К. Н., Барабанов А. Т., Павловский Е. С. Принципы и приемы адаптивно-ландшафтной системы земледелия // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. – 2012. – № 1(10). – С. 14-19.

134. Система земледелия Курской области / Д. Е. Ванин [и др.]. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 1978. – 179 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение……... 3
1. Методологические и методические основы исследований…..... 8
1.1. Анализ и оценка методов исследований…… 8
1.2. Генетические и статистические методы исследований и анализа материала…… 18
1.3. Системный подход в исследовании взаимосвязи природных и антропогенных факторов..... 19
2. Характеристика объектов исследований……..... 21
3. Теоретические основы формирования стока талых вод…… 27
3.1. Рельеф как фактор эрозионно-гидрологического процесса…… 27
3.1.1. Теоретические основы рельефообразования…….. 27
3.1.2. Функция формы склона и смыв почвы……. 34
3.2. Эрозионно-гидрологический процесс как фактор деградации и опустынивания…… 37
3.2.1. Общие положения……. 37
3.2.2. Влияние природных, антропогенных факторов и их взаимодействия на формирование поверхностного стока талых вод… 39
Современное состояние оценки роли природных факторов в формировании стока талых вод……..... 39
Влияние природных факторов на формирование стока на серых лесных почвах лесостепи ЦРНЗ…… 52
Влияние природных факторов на формирование стока на серых лесных почвах и черноземах ЦЧО…… 60
Влияние природных факторов на формирование стока на обыкновенных черноземах, каштановых и светло-каштановых почвах Поволжья 67
3.3. Закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод, его прогноз и методика расчета…… 80
3.3.1. Закон лимитирующих факторов поверхностного стока талых вод…….. 80
3.3.2. Методика прогноза и расчета стока……. 82
3.4. Влияние антропогенных факторов на формирование поверхностного стока талых вод…….. 87
3.4.1. Характеристика поверхностного стока талых вод на землях, не подверженных антропогенному воздействию……. 87
3.4.2. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод с сельскохозяйственных угодий на разных видах пашни.. 91
3.4.3. Оценка влияния характера использования пашни на формирование стока талых вод……. 117
3.4.4. Влияние стокорегулирующих лесополос на природные факторы формирования поверхностного стока талых вод……... 119

3.4.5. Влияние агротехнических противоэрозионных мероприятий на формирование поверхностного стока талых вод…….. 125
3.4.6. Влияние лугомелиоративных мероприятий на эрозионно-гидрологические процессы…….. 133
3.4.7. Влияние гидротехнических противоэрозионных мероприятий на эрозионно-гидрологические процессы…….. 134
3.5. Экспериментальная оценка новых приемов регулирования снегоотложения и поверхностного стока талых вод для управления эрозионно-гидрологическим процессом защитными лесными насаждениями……. 135
3.5.1. Система стокорегулирующих лесополос комбинированной конструкции……. 135
3.5.2. Система стокорегулирующих лесных полос с изменяющейся ветропроницаемостью…… 142
3.5.3. Кулисы в межполосном пространстве стокорегулирующих лесных полос……... 143
4. Система мероприятий по управлению эрозионно-гидрологическим процессом в адаптивно-ландшафтном земледелии…… 145
4.1. Общая характеристика противоэрозионных приемов..... 145
4.2.Концепция адаптивно-ландшафтного обустройства сельскохозяйственных земель и совершенствования системы земледелия…. 146
4.3. Научное обоснование адаптивно-ландшафтного обустройства сельскохозяйственных земель……... 152
4.3.1. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод……... 153
4.3.2. Закономерности впитывания воды в почву…… 154
Инфильтрация воды в талую почву, формирование сплошной менисковой пленки…… 154
Инфильтрация воды в мерзлую почву, формирование "ледяного экрана"……..... 155
4.4. Адаптивно-ландшафтное обустройство сельскохозяйственных земель и разработка почвозащитных систем земледелия…….. 157
4.4.1. Противоэрозионная организация территории…… 157
4.4.2. Технология агролесомелиоративного адаптивно-ландшафтного обустройства территории…… 163
Расчет стока талых вод и смыва почвы…… 163
Расчет расстояний между стокорегулирующими лесными полосами и другими рубежами……. 167
Назначение параметров проектируемых лесных полос…… 170
Заключение……... 172
Литература……... 177

А. Т. Барабанов

ЭРОЗИОННО-ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ТАЛЫХ ВОД И АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ

Редактор **Т. Е. Крохта**
Компьютерная верстка **В. Г. Гирявенко**
Ответственный за выпуск **С. А. Корпушов**

Подписано в печать 04.12.17.
Объем 11,5 уч.-изд. л. Формат 60x84/16.
Тираж 500 (первый завод 100). Заказ 10.

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