

ФГБОУ ВО  
АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

**Гончаров Никита Александрович**

**ПОЧВЕННО-КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ОРОСИТЕЛЬНЫХ МЕЛИОРАЦИЙ В ПЛОДОВЫХ САДАХ  
АЛТАЙСКОГО ПРИОБЬЯ**

Специальность 06.01.02 – Мелиорация, рекультивация и охрана земель

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:

к.с.-х.н., доцент

Болотов А.Г.

Барнаул – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ</b> ....	9
<b>ГЛАВА II. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	16
<b>ГЛАВА III. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА</b> .....	22
3.1. Климатические особенности территории в годы проведения исследования.....	22
3.2. Особенности изменения климата Алтайского края.....	26
3.3. Биологические особенности исследуемых плодовых культур.....	31
3.4. Почвенно-гидрофизические условия произрастания плодовых культур.....	33
<b>ГЛАВА IV. ВОДНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ПОД ПЛОДОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ</b> .....	44
4.1. Вероятность необходимости водных мелиораций в условиях плодового сада.....	44
4.1.1. <i>Распределение продуктивных запасов влаги за вегетационный период в годы исследования</i> .....	44
4.1.2. <i>Распределение вероятностей продуктивных запасов влаги и температуры почвы в условиях плодового сада</i> .....	49
4.1.3. <i>Формирование сценариев изменения климатических факторов</i> .....	53
4.2. Регулирование водного режима почвы.....	58
4.3. Биоклиматические коэффициенты яблоневых культур в условиях Алтайского Приобья.....	66
<b>ГЛАВА V. Математическое моделирование продуктивности плодовых культур в зависимости от условий внешней среды</b> .....	70
5.1. Требования растений к факторам внешней среды.....	70
5.1.1. <i>Общие сведения о факторах внешней среды</i> .....	70

5.1.2. Требования растений к водному режиму почв.....	72
5.1.3. Требования растений к тепловому режиму почв.....	73
5.1.4. Требования растений к пищевому режиму почв.....	76
5.2. Продуктивность плодовых культур в зависимости от условий среды.....	77
5.2.1. Продуктивность плодовых культур при естественном водном и тепловом режиме.....	77
5.2.2. Продуктивность плодовых культур при мелиоративном воздействии с управляемым водным и тепловым режимом.....	86
<b>ВЫВОДЫ</b> .....	96
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	99
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	122

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования:**

Алтайский край, занимающий площадь более 16,8 млн. га, является важным аграрным регионом, в котором к 1989 году мелиоративный фонд составлял 195 тыс. га орошаемых площадей (Орлова, 2011). Подъем и интенсификация сельского хозяйства в этом регионе требуют применения мелиораций, что вызвано особенностями умеренного резко континентального климата, в котором возможны как влажные, так и засушливые годы. Учитывая, что в последние годы частота возникновения неблагоприятных явлений (засуха, ливни, заморозки в течение вегетационного периода и проч.) увеличивается, важность мелиоративных мероприятий только усиливается.

Жизнь растений протекает при непрерывном взаимодействии их с окружающей средой, представляющей собой комплекс климатических, почвенно-гидротермических, биотических условий и условий, определяемых деятельностью человека. При этом основными факторами жизни растений являются пищевой, водный и тепловой режимы, формирование которых способствует воздействию на растения, что определяет скорость их роста и развития. Причем эти три режима должны быть оптимальными одновременно, т.к. это определяется «Законом Либиха», согласно которому - продуктивность растений определяется лимитирующим фактором среды.

По данным Алтайкрайстата площадь многолетних плодово-ягодных насаждений в хозяйствах Алтайского края всех категорий (на 1 июля 2006г) составляла 11964 гектаров. При этом практически все сады эксплуатируются в богарных условиях, однако характер естественной водообеспеченности Алтайского края не позволяет выращивать плодовые культуры без орошения. Сады на богарных землях дают невысокие, нестабильные урожаи, при этом плоды имеют низкие товарные качества. Поэтому обоснование необходимости проведения оросительных мелиораций в условиях Алтайского Приобья является актуальным.

**Цель исследований:** обоснование необходимости и эффективности проведения оросительных мелиораций в плодовых садах в условиях Алтайского Приобья.

**Задачи исследований:**

- 1) Исследование водно-физических свойств почв.
- 2) Изучение особенностей и закономерностей передвижения почвенной влаги в садах Алтайского Приобья в зависимости от культуры.
- 3) Оценка вероятности необходимости водных мелиораций в условиях плодового сада.
- 4) Расчет водного режима и режима орошения для оценки продуктивности плодовых культур.
- 5) Определение биоклиматических коэффициентов яблоневых культур в условиях Алтайского Приобья.
- 6) Оценка продуктивности плодовых культур при изменении абиотических факторов.

**Методы исследований:** Методика исследований основана на трудах отечественных и зарубежных ученых, информационных технологиях, фундаментальных положениях системного анализа, математического моделирования и вероятностно-статистического метода. В работе использованы современные инструментальные средства и методы математического моделирования процессов формирования условий среды при мелиорации земель, а также процессов формирования урожая сельскохозяйственных культур, выращиваемых в различных условиях, включая анализ и выбор математических моделей для оценки водного режима и водно-физических свойств почв, верификацию отдельных компонентов и системы в целом.

**Объектом исследования** является плодовой сад, рассматриваемый как компонент агромелиоративного комплекса.

**Предметом исследования** является процесс влагопереноса для формирования необходимого водного режима в почвах плодового сада.

**Научная новизна:** Впервые изучено влияние плодовых культур на водный режим почв в условиях сада Алтайского Приобья с обоснованием режима орошения и оценкой продуктивности плодовых культур при изменении внешних факторов среды. В работе предлагается методика определения необходимости оросительной мелиорации в условиях плодового сада.

**Защищаемые положения:**

На защиту выносятся:

– возможность решения проблемы устойчивости и увеличения урожайности плодовых культур с помощью оросительных мелиораций в условиях изменяющегося климата Алтайского края;

– результаты математического моделирования процессов влагопереноса в условиях плодового сада и расчета продуктивности яблони при орошении и без него;

– биологические коэффициенты для яблони в условиях Алтайского Приобья;

– почвенно-климатическое обоснование необходимости проведения оросительных мелиораций в различные фазы вегетационного периода плодового сада.

**Практическая значимость:** Результаты исследований позволили показать эффективность орошения и обосновать диапазон регулирования водного и теплового режима почв под плодовыми культурами, а также обосновать распределение воды для орошения плодовых культур в течение вегетационного периода. Результаты данной работы предполагается использовать для планирования дальнейшего развития мелиорации земель Алтайского края в условиях импортозамещения.

**Достоверность результатов заключается в следующем:**

- Использование длительных рядов метеорологических данных;

- Получение полевых инструментальных данных водного и теплового режима почв и их обработка статистическими и другими методами с оценкой вида законов распределения случайных величин;
- Использование современных математических моделей, адаптируемых под различные почвенно-климатические условия;
- Сравнение результатов моделирования с результатами инструментальных измерений;

#### **Личный вклад соискателя:**

Полевые и лабораторные измерения гидротермических свойств почв и режимов проведены автором лично. Также автором проведена обработка исходной информации, подготовка исходных данных для моделирования в программной среде *Hydrus* и по формулам В. В. Шабанова, а также проведение необходимых расчетов.

**Работа выполнена** на кафедре физики Алтайского государственного аграрного университета и апробирована на сортоиспытательных участках НИИСС им. М. А. Лисавенко (г. Барнаул).

**Апробация работы и публикации:** Основные положения диссертации доложены на VII Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: инновации и опыт» (г. Екатеринбург, 2014); X Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству Алтая» (г. Барнаул, 2015 г.). Материалы диссертации опубликованы в 6 статьях, в том числе 3 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Объем публикаций составляет 2,51 п.л., в том числе доля автора 0,85 п.л.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 122 страницах печатного текста, включая 8 таблиц, 45 рисунков, 2 приложений. Библиографический список включает 212 источников литературы, из них 181 отечественных и 31 зарубежных источников.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доценту А.Г. Болотову за постоянное внимание, поддержку и помощь при подготовке рукописи, а также благодарен И.В. Гефке, С.И. Завалишину и И.А. Гончарову за их помощь в проведении и обсуждении исследований.



## ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Теоретические основы насыщенного и ненасыщенного влагопереноса в почвах заложены в основополагающих трудах А. Дарси, Е. Букингема, Л.А. Ричардса, С.Ф. Аверьянова, В.В. Ведерникова, Н.Н. Веригина, А.Н. Костякова, И.П. Айдарова, А.И. Голованова, Л.М. Рекса, Муалема, ван Генухтена, И. Шимунека, Й. ван Дама, Пачепского и других исследователей.

В современном мире достаточно много статей, публикаций, научных трудов и исследований, касающихся вопроса моделирования влажности и теплопереноса почв, что говорит о повсеместном изучении данного вопроса. Решением вопроса моделированием процессов происходящих в почве занимаются математики, физики, геофизики, экологи, аграрии. Спектр территорий для построения моделей, также достаточно огромен, он включает в себя практически все сельскохозяйственные территории нашей страны от черноземов южных регионов до районов вечной мерзлоты севера. Инструментом изучения служат полученные эмпирические данные, которые анализируются теоретическим путем с построением модели. Указанный вопрос достаточно давно изучается не только в нашей стране, но и за рубежом (Arya and Paris, 1981; Герайзаде, 1982; Глобус, Бодров, 1982; Файбищенко, 1986; Пачепский, 1990; Branduk et al., 1994; Мильшин, 1998; Wosten et al., 1998; Рычѐва, 1999; Лавров, 2000; Rosney et al., 2002; Шеин, 2001, 2005, 2006, 2012, 2013; Кирста, 2004; Назаров, 2004; Макарычев, 2005, 2010; Микайылов, 2007, 2009; Бакаленко, 2008; Хворова, 2009, 2011, 2013; Погорелов, Киселев, 2009; Гриневский, 2010, 2014; Сызганов, 2011; Ефремов, 2012; Русин, 2012; Васильев, 2013; Мурадов, 2013; Крылов, 2013; Кашперюк, 2013; Черенкова, 2013; Симанкин, 2013; Кашченко, 2013; Демченко, 2013; Болотов, 2014; Воронина, 2014; Воротынцев, 2014; Панина и Шеин, 2014; Квачантирадзэ, 2014; Старцев, 2014).

Моделирование также широко используется в решении прикладных проблем в области мелиорации почв. Так в статье Т.А. Панковой (2014) представлены результаты моделирования различных режимов орошения

сельскохозяйственных культур для условий Саратовского Заволжья - от влажности завядания до наименьшей влагоемкости почвы.

Проблему экологически безопасного использования сточных вод на орошение, в своей статье описывают А.В. Тиньгаев, А.С. Давыдов (2012), описывая необходимость определения норм, сроков и числа поливов, а также учесть биологические особенности сельскохозяйственных культур, климатические, почвенные и гидрогеологические условия орошаемого участка, способы и техники полива, технологии возделывания растений. Целью исследований послужило экологически безопасное использование сточных вод на орошение. Моделирование режима орошения с использованием информационной технологии позволит обосновывать ресурсосберегающий и экологически безопасные режимы орошения, не допускающие попадания сточных вод птицефабрики в грунтовые воды и обеспечивающие необходимый уровень влажности в почве для роста многолетних трав.

А.Г. Поздеевым (2013) разработан вариант водобалансной модели «Осадки-сток». В результате имитационного моделирования в среде *MathCad* построены зависимости динамики накопления, стока и инфильтрации осадков с территории, запаса почвенной влажности, подповерхностного и склонового стока, испаряемой влаги и грунтовых вод, температуры почвы, площади лесов, болот, акваторий, полей и лугов.

Задачу оперативного расчета динамики почвенной влаги Р.А. Полуэктов (2013) относит к "вечным" проблемам физики почв. Поскольку стандартные методы оперативного измерения влажности почвы *on line* отсутствуют, единственным надежным способом получения информации о процессах увлажнения и иссушения почвы в реальных условиях сельскохозяйственного поля является расчетный метод с использованием тех или иных математических моделей. Два основных вопроса возникают при постановке задачи оперативного расчета динамики почвенной влаги. Первый связан с выбором подходящего алгоритма вычисления влагопереноса в

рассматриваемом слое почвы и потоков, связанных с сопутствующими процессами: транспирацией, физическим испарением и инфильтрацией влаги из этого слоя, а также подпиткой грунтовыми водами. Второй связан с доступностью информации, необходимой для настройки и эксплуатации модели. Достижения последних лет в области гидрофизики почв, физиологии растений и агрометеорологии позволяют предложить для решения этой задачи несколько вариантов. Различие между ними связано с объемом и стоимостью информационного обеспечения модели, с достижимой точностью расчетов, а также с областью потенциальной применимости результатов моделирования.

Н.Д. Бобарыкин (2014) считает важным элементом дальнейшего развития новых концепций управления режимом увлажнения корнеобитаемого слоя почвы (РУКС), при решении прямой задачи в силу большого объема компьютерных вычислений, выполняемых на основе трехмерной нестационарной математической модели польдерных систем (ПС), с учетом сложности структуры и большого количества обрабатываемых выходных данных, является решение обратной задачи, которое строится на основе трехмерного функционала потока влажности почвы  $U(Q, h, H)$ , определяемого производительностью насосной станции  $Q$ , высотой корнеобитаемой зоны почвы  $h$  и уровнем грунтовых вод (УГВ) в зависимости от времени физического процесса. Стратегия оптимального управления РУКС осуществляется на основе варьирования значений производительности насосных станций в режимах откачки и подачи воды в сеть проводящих каналов, при выполнении критериев качества ПС.

В своей работе Е.А. Ветренко (2014) рассматривает различные уравнения передвижения влаги в почве при внутрпочвенном орошении. Приведено обоснование выбора модели влагопереноса при односторонней укладке внутрпочвенных увлажнителей с учетом влагоотбора корнями яблоневого сада.

Таким образом, использование моделей позволяет выбрать оптимальную стратегию воздействия на объект и дает возможность сократить объем экспериментальных работ при мелиоративном обследовании. Моделирование, как средство познания окружающей среды, позволяет открыть новые возможности для долгосрочных расчетов обоснования оросительных мелиораций в условиях изменяющегося климата.

В литературе имеется достаточно сведений об исследованиях динамики водопотребления и разработке режимов орошения плодовых культур для различных регионов нашей страны и стран СНГ: для условий Южного Дагестана (Пашаев, 1966); Краснодарского края (Дудникова, 1990); предгорной зоны Армении (Узунян, 1974); Нижнего Поволжья (Рыбалко, 1999). Во всех работах отмечена необходимость проведения вегетационных поливов в плодовом саду, количество которых, а также значения поливных норм зависят от почвенно-климатической зоны конкретной территории.

Так, Л.В. Шолоховым (1963), на основе всестороннего анализа влияния различного водного режима почвы на рост и плодоношение яблони, с учётом их биологических особенностей, разработаны режим орошения в комплексе с питательным режимом и динамикой водопотребления яблони в условиях Кабардино-Балкарии. Поливы проводились по бороздам длиной 100-300 м, при этом было установлено необходимость проведения в яблоневом саду 3-4-х вегетационных поливов нормой  $600 \text{ м}^3/\text{га}$ . Для этого необходимо поддержание влажности почвы в слое 100 см не ниже величины 80 % НВ с проведением влагозарядкового полива нормой 800 - 1200  $\text{м}^3/\text{га}$ .

Результаты наблюдений показывают, что в условиях степной зоны Хакасии орошение плодовых культур обеспечило резкое и устойчивое по годам повышение урожайности. В среднем за три года прибавка урожая составила, в зависимости от сорта 35-65% (Добрынин, 1973).

В условиях Саратовского Заволжья при проведении поливов по бороздам длиной 400м установлено, что для плодоношения яблонь нужно, чтобы влажность почвы в плодовом саду была не менее 80% НВ. Для этого в

требуется проводить от 1-2 до 3 вегетационных поливов нормой 700-800  $m^3/ga$ , в зависимости от условий увлажнения года. Также необходим осенний влагозарядковый полив нормой 1300-1400  $m^3/ga$  (Малышева, 1968)

Для условий Молдавии И.С. Флюрцэ (1971) проводил бороздковые поливы яблоневых насаждений. Исследованиями было установлено, что поддержание влажности в активном слое почвы для садов должно быть не ниже 80 % НВ. Для этого необходимо применение динамических схем полива, зависящих от количества и характера выпадения осадков, а также температурного режима, при этом число поливов равняется от 1 до 4. Также для условий Молдавии Ф.К. Поповичем (1983) были проведены поливы различными способами: дождеванием, по бороздам и капельным способом. Им было выявлено, что наиболее оптимальный режим орошения, соответствует поддержанию предполивного порогу влажности почвы на уровне 80% НВ. К таким же выводам пришел О.К. Хоржан (1985) при проведении дождевания в яблоневом саду в условиях Приднестровья Молдавии. Им было рекомендовано поддерживать влажность метрового слоя почвы на уровне 75 - 80 % НВ.

Для яблоневых насаждений в условиях степной зоны Украины А.Ф.Литвиненко (1986) рекомендовал поддерживать влажность почвы в саду равной 70 % НВ в метровом слое почвы. Исследования проводились на сортах Ренет Симиренко и Джонатан на сильнорослых подвоях при поведении поливов дождеванием.

Для Приазовской зоны Ростовской области при поливе по бороздам разработаны рекомендации по орошению, а также показаны улучшения в росте и развитии яблоневых насаждений при поливных нормах 800  $m^3/ga$  на тяжелосуглинистых и 700  $m^3/ga$  на среднесуглинистых почвах при водообеспеченности 80% НВ (Дудникова и Марков, 1989).

В условиях Краснодарского края рекомендуется при поливе капельным способом яблоневого сада поддерживать влажность почвы на уровне 70-80 % НВ (Завадский, 1991). При таком же уровне поддержания влажности почвы

(70-80% НВ) в слое 1 метр производилось микроорошение яблони на крутосклонных землях Ферганской долины при оросительной норме 4500-5000  $m^3/ga$  (Нурабаев, 1992).

Для условий Волгоградской области Г.И. Гориним (1955) разработаны рекомендации по оросительным мелиорациям. Данные рекомендации используются по настоящее время. В результате исследований, проводимых на Волгоградской опытно-мелиоративной станции, было выявлено увеличение темпов роста яблони при предполивном уровне 80-85 % НВ, однако это сопровождается высокими дополнительными затратами воды (Багров, 1965). Также, в Волгоградском Заволжье, проводились исследования влияния полива затоплением, при поливной норме 1500-2000  $m^3/ga$ , на молодые деревья вишни и яблони (Мамин, 1970). Изучена реакция яблони на поддержание различных уровней предполивного порога влажности почвы при орошении дождеванием (Мельников, 1977). В работе Е.Ю. Галиуллиной (2015) отмечено, что многочисленные исследования проведенные в Волгоградском регионе не охватывают в полной мере всех вопросов орошения яблоневых садов на этой территории. Сказываются различия почвенных условий, применяемых способов полива, разнообразия сортовых комбинаций.

Сходная ситуация наблюдается и в Алтайском регионе, где вопросам орошения плодово-ягодных садов, на наш взгляд, уделялось недостаточное внимание. Характер естественной водообеспеченности Алтайского края не позволяет собирать полноценные урожаи плодовых культур без орошения. Так, результаты опытов, проведенных в НИИСС им. М. А. Лисавенко показывают, что использование орошения в зонах недостаточного увлажнения способствует увеличению урожайности семечковых и косточковых культур на 30-40%, смородины черной – на 60% (Калинина, 1970; Стрельцов, 1974; Харламов, 1973). В работе Ф. Ф. Стрельцова (2009) приводятся данные по доработке конструкции автоматизированной системы орошения в теплице для полива зеленых черенков плодовых и ягодных

культур. Применение усовершенствованного авторегулятора полива и электроклапанов низкого напряжения повышают технику безопасности при работе с оросительными установками в теплицах.

Известно, что рекомендации по режиму орошения, разработанные для одних почвенно-климатических условий и культур нельзя применять для других. На сегодняшний день практически не существует научно-обоснованных рекомендаций по расчету и оптимизации режима орошения плодовых садов в условиях Алтайского Приобья, что обусловило актуальность исследований.

## ГЛАВА II. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований является плодовый сад, рассматриваемый как компонент агромелиоративного комплекса с целью изучения особенностей формирования необходимого водного режима в почвах под плодовыми насаждениями в условиях Алтайского Приобья. Исследования проводились в 2012-2014 гг. в НИИСС им. М.А. Лисавенко на сортоиспытательных участках, расположенных в пригороде г. Барнаула, на левом берегу реки Оби Высокого Приобского плато. «Согласно почвенно-географическому районированию Алтайского края данная территория находится в подзоне обыкновенных черноземов умеренно-засушливой и колючной степи, в районе черноземов обыкновенных среднемощных среднегумусных и маломощных малогумусных, черноземов карбонатных и смытых (Почвы Алтайского края, 1959)». Исследуемая почва – чернозем выщелоченный, маломощный, малогумусный, среднесуглинистый.

В полевой период проведено изучение почв методом заложения почвенно-геоморфологического профиля с отбором образцов для лабораторных анализов. Были измерены температура и влажность почвы в метровом слое почвы в течение вегетационного периода.

Определение физических свойств почв проведено с помощью общепринятых методов (Вадюнина, Корчагина, 1986; Шеин, 2005, Теории и методы, 2007). Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) и функция влагопроводности (ФВ) определена методом равновесного центрифугирования (Смагин и др., 1998), при использовании лабораторной центрифуги *TG16WS* с максимальной частотой вращения 12000 *об/мин*.

Тепловой режим изучен с помощью полевого измерителя температуры, основанного на технологии *1-Wire* с применением датчиков *DS18B20*, производства фирмы "Dallas Semiconductor - Maxim", США (Болотов, 2012). Данный тип датчиков зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под №23169-02 и допущен к применению в Российской Федерации.



Полевая влажность определена термостатно-весовым способом и электронным диэлькометрическим влагомером-логгером E+soil MCT, производства фирмы Eijkelkamp Agrisearch Equipment (Нидерланды) (E+Soil MCT-sensor, 2013). Экспериментальные данные ОГХ аппроксимированы уравнениями (van Genuchten, 1980; Brooks Corey, 1964). Функция влагопроводности - уравнением (Mualem, 1976).

Современное управление гидротермическим режимом почв основывается на поливариантных расчетах этого режима и выборе оптимального варианта воздействия на почвенный покров для их улучшения. При таких расчетах используются математические модели переноса тепла и влаги в почве. В настоящее время, на этапе развития методов моделирования тепло-влаги-солепереноса в почвах существует достаточное количество программных средств, применение которых определяется различными факторами. В мелиорации для расчета поливных норм, сроков полива и т.д. растений обычно используются специализированные программные пакеты, например *SWAT*, *MWSWAT* (Neitsch et al., 2005, 2011, 2012; Leon et al., 2014; Дунаева и др., 2015), *CROPWAT*, *AGROTOOL*. Эти инструменты агрогидрологического моделирования, способны решать многие научно-технические проблемы, связанные с моделированием продукционного процесса. Однако, на наш взгляд, узкоспециализированность этих программ, ограничивает решение широкого спектра фундаментальных проблем переноса энергии и вещества в почвах, частным случаем которых являются различные вопросы водных мелиораций. Поэтому нами, для моделирования отдельных составляющих водного режима почвы использована прогнозная модель *Hydrus-1D* (разработчики Simunek and van Genuchten, Департамент экологических наук Калифорнийского университета Риверсайд, Калифорния, США). *Hydrus-1D* является свободно распространяемой *Windows*-средой моделирования анализа расхода воды и растворенных веществ транспортом в перемененно насыщенных пористых средах. Программный пакет включает одномерно конечно-элементную модель для имитации движения воды, тепла

и растворенных веществ, переменного насыщенных средах. Модель поддерживает интерактивную графику-интерфейс для предварительной обработки данных, дискретизации почвенного профиля, и графическое представление результатов (Simunek and van Genuchten, 2004). В России данный программный пакет рекомендован для применения в решении фундаментальных и прикладных задач в области мелиорации почв кафедрой физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. Ломоносова, г. Москва.

В программе *Hydrus* движение воды в ненасыщенной дисперсно-пористой среде описывается модифицированным уравнением Ричардса, в котором пренебрегается газовой фазой в процессе влагопереноса в поровом пространстве, а также стоком воды из-за тепловых градиентов (Шейн, 2005):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_r \frac{\partial P}{\partial z} \right) \pm I_w \quad (1)$$

где  $P$  – давление почвенной влаги,  $\theta$  – объемная влажность,  $t$  – время,  $z$  – пространственная координата,  $I_w$  – функция «источник-сток».

Для работы модели необходимо наличие входных экспериментальных данных, отражающих максимально точно свойства имитируемого объекта, для которого производится прогноз. Для почвы это основные гидрофизические свойства почвы (влагопроводность и ОГХ). Введение ОГХ производилось непосредственным введением параметров аппроксимации ван Генухтена, функциональная зависимость которых имеет вид (van Genuchten, 1980):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}; S_e = \left( \frac{1}{1 + (\alpha P)^n} \right)^m; m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

где  $S_e$  – равновесная влажность, соответствующая капиллярно-адсорбционному давлению  $P$  для данной ОГХ,  $\alpha$  – величина, обратная давлению входа воздуха ( $см^{-1}$ ),  $n$  – индекс распределения пор по размерам,  $\theta_r$  – остаточная влажность,  $\theta_s$  – влажность насыщения.

Для функции влагопроводности использовано уравнение Генухтена-Муалема взаимосвязи между ОГХ и функцией влагопроводности (Теории и методы, 2007):

$$K_r = K_s \sqrt{S_e} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right)^2; \quad 0 < m < 1 \quad (3)$$

где  $K_r$  – значение влагопроводности для соответствующей влажности  $\theta$ . В качестве экспериментальной информации по гидрофизическим свойствам почв необходимо экспериментальное определение ОГХ и  $K_s$ .

Представленные выше уравнения содержат независимые параметры:  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ , и  $K_s$ . Параметр взаимосвязи пор  $l$  в функции влагопроводности приблизительно равнялся 0,5 как среднее значение для большинства почв (Mualem, 1976).

Входной информацией для расчета водного режима являются среднесуточная температура воздуха, солнечная радиация, скорость ветра и атмосферное давление. Для расчета отбора влаги корнями растений в *Hydrus* заложены параметры для большинства сельскохозяйственных культур, в том числе и плодовых.

Кроме гидрофизических свойств почвы, для моделирования необходимо задать условия на верхней и нижней границе (осадки, дренаж, испаряемость, транспирация, растительный покров и др.). Для начала работы модели, ей необходимо начинать расчет с начальных условий. В качестве начальных условий нами была принята начальная, на момент расчета, влажность по глубине. В качестве верхнего граничного условия были использованы следующие метеоданные: количество осадков (см. водн. слоя) и их продолжительность (в сутках), испаряемость (см. водн. слоя) для каждого дня всего запланированного периода проведения расчета. Нижнее граничное условие задано как значение градиента давления равное 1.

Анализ расчетных и экспериментальных данных значений объемной влажности почвы, а также значений относительной среднеквадратичной ошибки показал, что наиболее точно *HYDRUS* воспроизводит динамику

влажности при входных параметрах, полученных из экспериментальных значений влажности почвы, гидрофизических параметрах ван-Генухтена для данного поля. При этом ошибка расчета не превышала 8-10%. Поэтому применение расчетных данных по влажности почвы в данной работе можно считать обоснованным.

Для расчета пространственно-временного распределения температуры почвы использовано классическое уравнение теплопереноса (Карслоу, Егер, 1964; Тихонов, Самарский, 1966; Куртнер, Решетин, 1970; Нерпин, Чудновский, 1975; Чудновский, 1976; Куртнер, Чудновский, 1979; Шеин, 2005; Kirham et al., 1972; Horton, 1982; Juri et al., 1991):

$$c_v(x,t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x,t) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (4)$$

где  $T(x,t)$  – температура почвы в точке  $x$  момент времени  $t$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_v = \rho_b c_m$  – объемная теплоемкость;  $\rho_b$  – плотность почвы;  $c_m$  – удельная теплоемкость.

*Hydrus* использует метод конечных элементов в пространстве и во времени для нахождения численного решения уравнения теплового потока. Пользователь задает максимальную глубину почвенного профиля и пространственную сетку, которая может быть переменной, а затем *Hydrus* регулирует шаг по времени, чтобы сохранить точное решение.

Надежность полученных расчетных значений влажности (температуры) почвы оценивалась сравнением их с экспериментальными по относительной среднеквадратичной ошибке (Schaap, 2004; Шеин, Архангельская, 2006):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\theta_{расч_i} - \theta_{экс_i}}{\theta_{экс_i}} \right)^2}{n}} \quad (5)$$

где  $\theta_{экс_i}$  и  $\theta_{расч_i}$  – экспериментальные и вычисленные по модели пары значений объемной влажности (температуры),  $n$  – количество измерений.

Валидация *Hydrus* по динамике влажности почвы показала высокую степень достоверности модельных расчетов с реальными данными, полученными в полевых условиях. В целом модель *Hydrus* может быть рекомендована к применению для моделирования режимов орошения сельскохозяйственных культур.

Статистическая обработка полученных данных произведена с помощью программного пакета *Excel*.

## ГЛАВА III. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 3.1. Климатические особенности территории в годы проведения исследования

«Алтайский край расположен на территории лесостепной зоны и по агроклиматическому районированию относится к теплому недостаточно увлажненному климатическому району, характеризующемуся продолжительной и суровой зимой, достаточно жарким и коротким летом, поздними весенними и раннеосенними заморозками (Агроклиматические ресурсы Алтайского края, 1971)». Суровые климатические условия, характеризующиеся зимними низкими температурами, создают реальную опасность вымерзания растений, т.к. резкие колебания температуры почвы и воздуха отрицательно влияют на растения. Весенние и зимние колебания климатических факторов значительно увеличивают негативное воздействие на плодовые культуры, при этом летом нередки засухи. Весной воздействие низких температур (в том числе заморозков) замедляет развитие растений, угрожает их целостности. Воздействие низких температур на растения бывает даже в начале лета и заморозки происходят вплоть до второй половины июня. В конце августа, а также осенью ранние заморозки прерывают вегетацию, наряду с недостаточным количеством осадков летом. Положительные стороны климатических условий Алтайского края для ведения садоводства, которые все же позволяют нормально развиваться плодовым культурам: продолжительный световой день, большое число часов солнечного сияния, как правило, жаркое лето, при этом летних тепловых ресурсов достаточно для возделывания плодовых культур.

Проанализируем среднеголетние метеорологические данные, характеризующие климатические особенности зоны исследований. Средняя многолетняя температура воздуха –  $2,1^{\circ}\text{C}$ , при этом самый холодный месяц январь с температурой  $-17,5^{\circ}\text{C}$ , а абсолютный минимум  $-52^{\circ}\text{C}$  отмечен в 1931г. Самым теплым месяцем является июль, его средняя температура равна  $19,3^{\circ}\text{C}$ , при этом абсолютный максимум был отмечен в 1953 году с

температурой 41°C. Средняя сумма положительных температур составляет 2495°C. «Режим атмосферного увлажнения колючей степи Алтайского края отличается неустойчивостью по годам и неравномерностью в течение года (Харламова, 2012)». Низкая относительная влажность воздуха (средняя годовая равна 71%) при его высоких температурах вызывает повышенную испаряемость с поверхности почвы. Наибольшие величины относительной влажности отмечаются с ноября по март (75-80%), а наименьшие - в мае - июне (56-62%). Среднегодовое количество осадков составляет 530 мм. Максимальное количество осадков выпадает в июле (70 мм), минимальное - в апреле (23 мм). Наибольшая продолжительность осадков приходится на ноябрь (203 часа), январь (215 часов), наименьшая - на летние месяцы с минимумом в июле (33 часа).

Преобладающими направлениями ветра являются юго-западное и южное и занимающими господствующее положение в январе-мае и августе-декабре. В июне и июле преимущественно наблюдаются ветры северного и северо-восточного направлений, когда часты случаи безветренной погоды. Среднегодовая скорость ветра составляет 3,2 м/с, наибольшая - в ноябре (4,1 м/с), минимальная - в июле (2,3 м/с). В течение года отмечается 39 дней со скоростью ветра равной или более 15 м/с. Продолжительность безморозного периода составляет 120 дней, при длительности вегетационного периода 150-165 дней.

За годы исследований проанализированы данные метеостанции НИИСС им. М.А. Лисавенко, которые позволяют охарактеризовать климатические условия за время наблюдений.

Наблюдения за температурным режимом почвы нами были начаты осенью 2011 года, когда первый осенний заморозок отмечен 11 октября и составил -3,6°C в воздухе и -8,5°C на поверхности почвы. В данный период не отмечено значительных отклонений температуры воздуха от среднесезонных значений. Абсолютный минимум температуры воздуха был зафиксирован в январе и составил -38°C. Зимний период

характеризовался значительным недостатком осадков, их количество составило 12; 8; и 1,2 мм в декабре, январе и феврале соответственно при отклонении от среднемноголетних значений на 12, 15 и 17 мм соответственно, что для плодово-ягодных культур не является критическим, при этом высота снежного покрова равнялась 28 см.

Весенний период 2012 г. был недостаточно влагообеспечен. Так в мае и июне осадков выпало 25 мм и 11 мм соответственно, что на 15 мм и 33 мм меньше среднемноголетних значений. Однако в июле осадки (больше на 34 мм среднемноголетних значений) частично восполнили дефицит влаги. «Исключительно жарким оказался летний период, когда среднемесячная температура в июне, июле и августе составляла 22,6°C; 22,4°C и 18,3°C, что выше среднемноголетней на 4,8°C; 3,0°C и 1,6°C соответственно. Максимальная температура воздуха достигла 33,5°C и зафиксирована в июле. Сумма активных температур более 5°C составила 2685°C, более 10°C – 2055°C. Последний весенний заморозок в воздухе был зафиксирован 10 мая и составил -2,5°C, на поверхности почвы -6,0°C. Первый осенний заморозок отмечен 11 октября и составил – 3,6°C в воздухе и -8,5°C на поверхности почвы. Длина безморозного периода составила 153 дня (с 10 мая по 11 октября)».

В зимний период 2012-2013 гг сформировались экстремальные погодные условия, значительно отличающиеся от среднемноголетних значений, так в ноябре выпало 89 мм осадков в виде снега, что на 60 мм больше среднемноголетних значений. В январе, феврале и марте с количество выпавших осадков превышало среднемноголетние на 6, 1 и 21 мм, что вызвало значительное повреждение кустарниковых растений снеголомами. При этом максимальная высота снежного покрова отмечена на уровне 67 см. Низкие температуры в декабре, когда среднемесячная температура воздуха составила -22°C (минимум -41°C), что на 9°C ниже среднемноголетнего значения не оказали отрицательного воздействия на



перезимовку растений, что обусловлено высоким уровнем снега, обладающего теплоизолирующими свойствами.

Вегетационный период 2013 года был недостаточно теплообеспечен, когда среднемесячные температуры в мае, июне и июле были ниже среднемноголетних значений на 1,6; 2,0 и 0,4°C соответственно, при этом максимальная температура воздуха достигла 33,5°C и была зафиксирована в июле. Сумма активных температур более 5°C составила 2103°C, более 10°C – 1585°C. Последний весенний заморозок в воздухе был отмечен 20 апреля (-0,2°C) и на поверхности почвы 16 мая (-0,3°C). Первый осенний заморозок отмечен 13 сентября и составил -0,5°C в воздухе, а на поверхности почвы 8 сентября -1,0°C, при этом длина безморозного периода составила 145 дней (с 20 апреля по 13 сентября). За данный период осадков выпало больше среднемноголетних значений, в мае на 58 мм осадков выпало 106,0 мм, что на 66,0 мм больше среднемноголетних значений. В июне, июле и августе выпало 54,9; 154,7 и 62,7 мм, что на 10,9; 90,7 и 17,7 мм больше среднемноголетних значений соответственно.

Зимние осадки периода 2013-14гг выпали в октябре 2013г., при этом в ноябре зафиксировано превышение суммы осадков на 16 мм среднемноголетних значений, а в декабре уменьшение на 7 мм. В январе и феврале 2014 г. их отмечено увеличение значений на 8 и 7 мм., чем среднемноголетние. Максимальная высота снежного покрова составила 41 см. Значения температуры воздуха зимой за данный период превышали среднемноголетние значения на 6,4°C, 1°C в декабре и январе. В феврале среднемесячная температура составила -18,8°C, что на 3,6°C ниже среднемноголетней. Минимальная температура воздуха достигала -36,5°C в феврале. Летних осадков в апреле и июне выпало меньше нормы на 11 мм и 22 мм, что компенсировалось увеличенными значениями в мае и июле на 11 и 44 мм соответственно, и их оказалось достаточно для удовлетворительного роста и развития растений.

Весенние среднемесячные температуры апреля и мая были выше на  $4,6^{\circ}\text{C}$  и  $3,9^{\circ}\text{C}$  среднемноголетних значений, а в течение периода вегетации на уровне с небольшим недостатком тепла в мае и сентябре. Максимальная температура воздуха достигала  $35,9^{\circ}\text{C}$  и была зафиксирована в июле и чуть меньшими значениями в июне и августе.

Таким образом, погодные условия в годы проведения исследований внесли определенные различия в рост и развитие плодовых культур, а также существенно отразились на процессах аккумуляции и распространения тепла и влаги в почве.

### **3.2. Особенности изменения климата Алтайского края**

Как было показано выше, моделирование позволяет открыть новые возможности для долгосрочных расчетов обоснования мелиораций, что важно в условиях изменяющегося климата.

Рассмотрим климатические изменения в Алтайском крае за последнее столетие. Согласно докладу Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год, «данные наблюдений и модельных расчетов показывают, что климат территории России более чувствителен к глобальному потеплению, чем климат многих других регионов земного шара». Размах аномалий среднегодовой температуры по территории России достигает  $3-4^{\circ}\text{C}$  (по данным 2012 года до  $7^{\circ}\text{C}$  и более), в то время как для земного шара он лишь несколько превосходит  $1^{\circ}\text{C}$ . За последние 100 лет (1907–2006 гг.) по данным сети Росгидромета потепление в целом по России составило  $1,29^{\circ}\text{C}$  при среднем глобальном потеплении, согласно Второго оценочного доклада Росгидромета,  $0,74^{\circ}\text{C}$  (Резюме..., 2014) (рис.1). При этом для Алтайского края (метеостанция Барнаул, 1838–2008г.), рост температуры превысил  $3^{\circ}\text{C}$  за 100 лет. Отмечается, что потепление наиболее характерно для зимнего и весеннего сезонов.

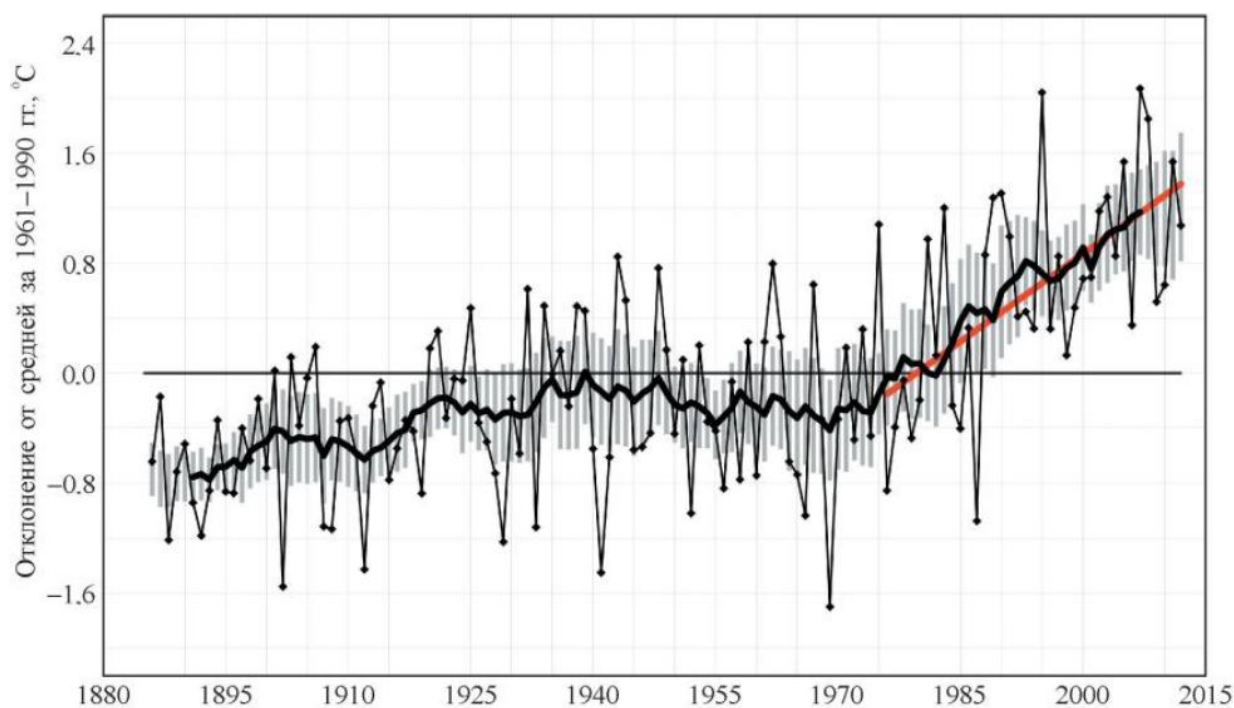


Рис.1. Изменения аномалий среднегодовой температуры приземного воздуха, осредненных по территории России, в течение 1886-2012 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от средних за 1961-1990 гг. Жирная кривая показывает сглаженный ход температуры (11-летние скользящие средние). Вертикальными отрезками показан 95%-ный доверительный интервал для 11-летних средних (без учета ошибок пространственного осреднения и нарушений однородности). Красная линия – тренд за 1976-2012 гг.

«Вследствие сложной физической природы явления и неоднородности инструментальных наблюдений изменения осадков изучены значительно хуже, чем изменения приземной температуры воздуха. Годовая сумма осадков за период 1976-2006 гг. в целом по территории России увеличивалась (7,2 мм/10 лет). Долговременные тренды отмечаются на фоне мелкомасштабных отклонений положительного и отрицательного знака, которые носят циклический (ритмический) характер. Сохраняется вероятность поздних весенних заморозков и ранних осенних при возрастании экстремальной изменчивости. В последние годы увеличивается повторяемость очень низких абсолютных минимумов температуры воздуха.

Наблюдается рост межгодовой изменчивости (контрастности) сезонов (Харламова, 2012)».

Климат Алтайского региона в целом резко континентальный, с продолжительными и холодными зимами и короткими, но жарким летом. Одним из характерных признаков континентальности климата являются частые заморозки, которые нередко наблюдаются в вегетационный период. На востоке и юге лето обычно дождливое, но на западе, в Кулунде, часто бывают засухи. По мере продвижения на юго-восток, в предгорной части края континентальность климата заметно ослабевает: зима становится теплее, а лето более прохладным.

Данные, иллюстрирующие тенденции климатических показателей (среднегодовой температуры и осадков) по региону представлены на рис.2-4.

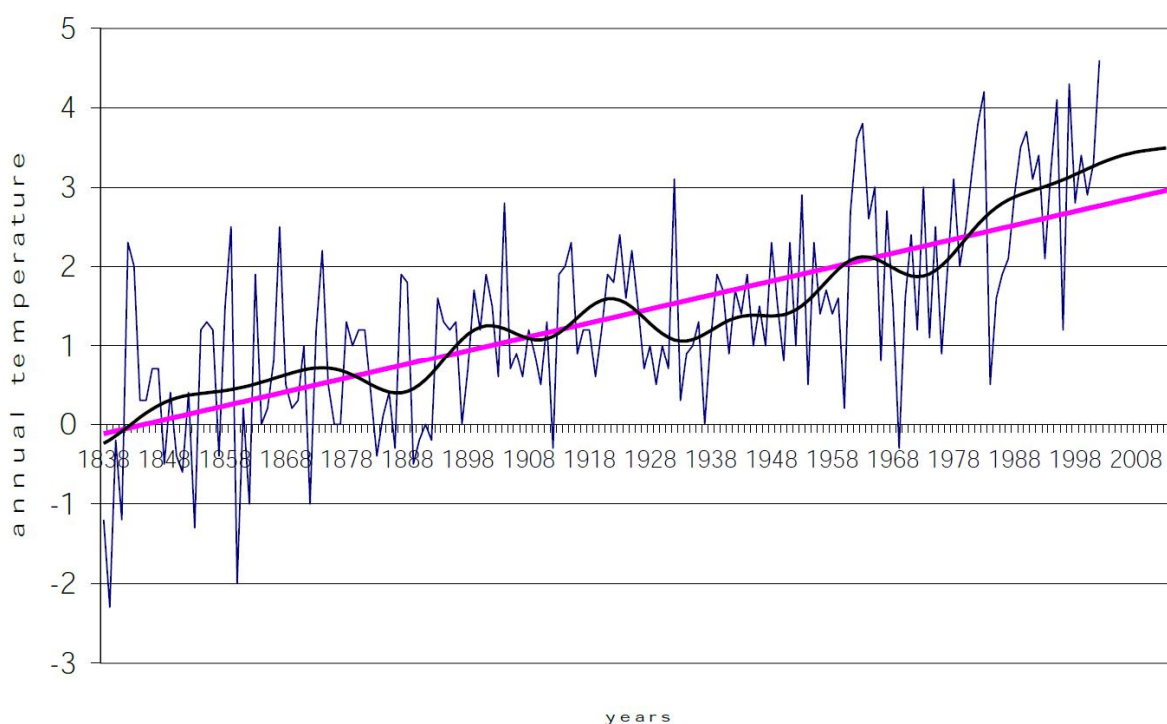


Рис.2. Изменения среднегодовой температуры воздуха (градусов Цельсия), метеостанция г. Барнаул. Линейный тренд и низкочастотные колебания (Харламова, 2012).

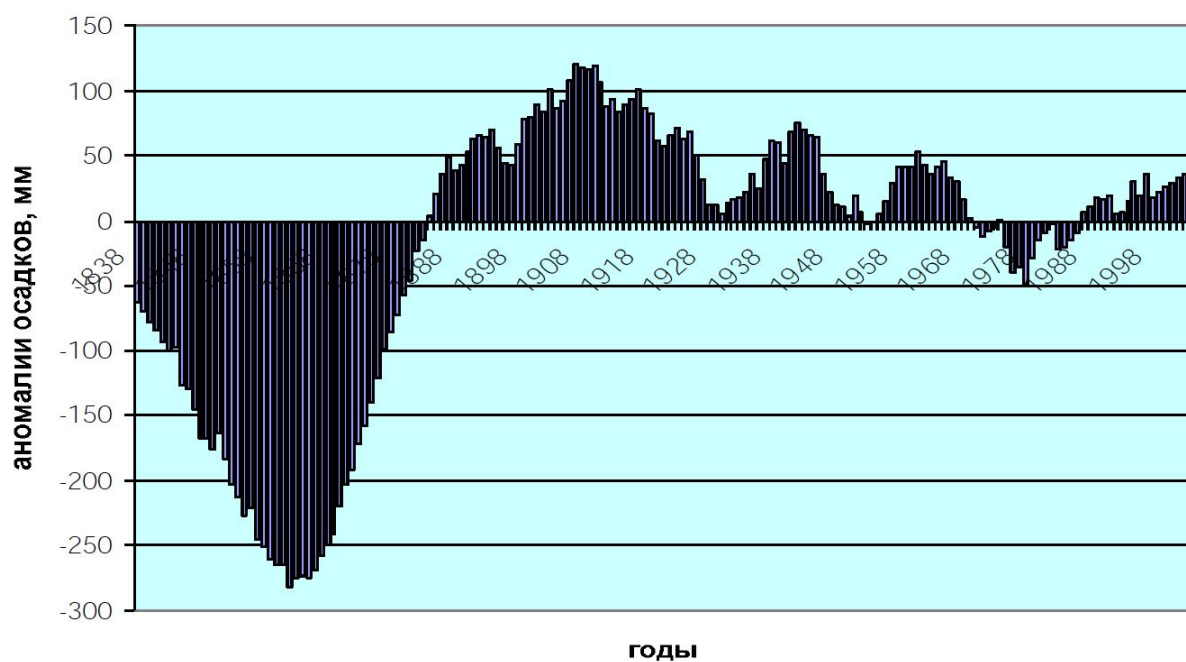


Рис. 3. Отклонения годовой суммы осадков от средней за 1961-1990 гг., сглаженные 11-летним скользящим фильтром (Харламова, 2012).

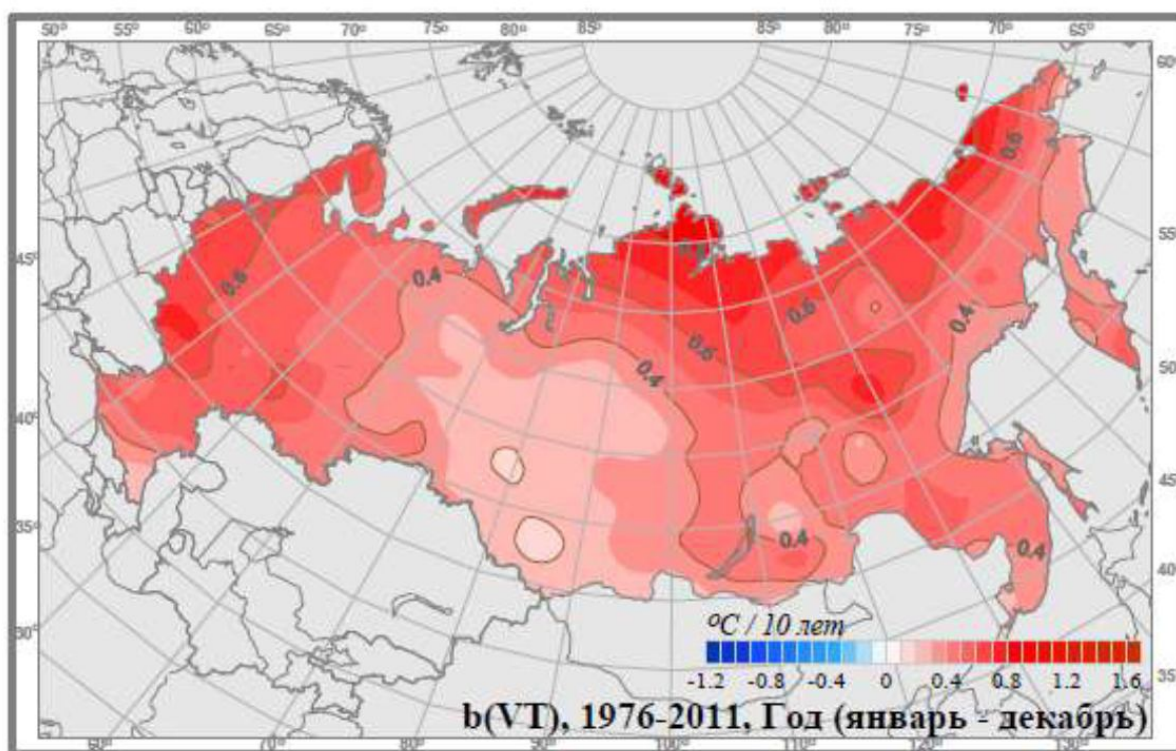


Рис. 4. Средняя скорость изменения температуры приземного воздуха (°C/10 лет) на территории России по данным наблюдений за 1976-2006 гг. (Резюме, 2014).

В горной системе Алтая на характер климата, естественно, оказывают влияние направление горных хребтов, высота над уровнем моря, т.е. проявляется вертикальная зональность климата. Особенностью высокогорного климата Алтайского региона являются меньшие пределы изменений среднегодовой температуры по сравнению с резко-континентальным климатом котловин. Использование приема стандартизации позволяет определить, что рассчитанная величина потепления для высокогорий Алтае-Саянского экорегиона, несмотря на меньшую величину, является вполне сопоставимой в среднесезонном выводе не только с равнинными метеостанциями, но и с некоторыми котловинами.

Начиная с 2005 г. для территории Алтайского региона прогнозировалось возрастание степени суровости холодного сезона, которое наиболее ярко проявилось зимой 2009-2010 гг. А увеличение повторяемости экстремальных погодных явлений, как и межгодовой изменчивости температур воздуха, позволило климатологу Н.Л. Добрецову определить еще одну, все более усиливающуюся характерную тенденцию современных изменений климата как «нарастающую конфликтность погоды».

Наблюдается общая тенденция аридизации территории Алтае-Саянского экорегиона на фоне потепления, которая может не только сохраниться, но и усилиться в ближайшие десятилетия. При этом особое значение имеет, прежде всего, соотношение тепло- и влагообеспеченности территории. С конца 70-х прошлого столетия в пределах региона почти повсеместно наблюдается увеличение количества осадков, однако, это не аналогично «увеличению увлажненности». Только соотношение балансов тепла и влаги предопределяет условия произрастания растительности и динамику других компонентов. Нижняя граница пояса лесной растительности в горах Алтая как раз и определяется увеличением увлажненности вследствие уменьшения максимальных температур и возрастания количества осадков по склонам.

Поднятие вверх пределов распространения всех высотно-поясных комплексов может свидетельствовать не об увеличении увлажненности, а об увеличении высоты уровня, с которого количество выпадающих осадков становится достаточным для произрастания древесной растительности на фоне повышения температуры воздуха. При этом расширяются вверх и пределы распространения нижних поясов лесостепных и степных комплексов, соответственно, увеличиваются площади, занятые растительностью, характерной для полузасушливых и засушливых областей.

Переветывание песков как следствие не движений ветра, а «особых процессов иссушения и разрыхления поверхностного покрова» также выявляет возрастание суточной амплитуды температуры в условиях более сухого воздуха, способствующее активизации процессов выветривания и др. Также большое значение для агропромышленных районов Алтайского края имеют ярко выраженные эффекты изменения климата - возникновение нехарактерных для теплого сезона снежных «переметов», приводящих к гибели насаждений и урожая сельхозпродукции в отсутствии лесозащитных полос.

Резюмируя, можно отметить, что в современных условиях особо актуальным становится вопрос об адаптации аграрного производства в связи с изменением климата. Одним из мощных факторов управления средой обитания растений являются оросительные мелиорации, поэтому рассмотренные особенности изменения климата необходимо учитывать при разработке режимов орошения сельскохозяйственных культур, в том числе и плодовых.

### **3.3. Биологические особенности исследуемых плодовых культур**

В нашей стране яблоня считается ведущей плодовой культурой, при этом её насаждения занимают около половины площади всех плодовых культур. Яблоня и груша относятся к семейству розоцветных, роду *Malus* и *Pyrus L* соответственно. В Сибири и Дальнем Востоке выращивают в

основном ранетки и полукультурки, а также крупноплодные сорта, при этом плоды сибирских яблонь богаче южных и европейских в 1,5-2,5 раза пектиновыми веществами и в них содержится в 3-5 раз больше витаминов *C* и *P*. В плодах яблони наряду с сахарами содержатся соли железа, натрия, марганца, калия, фосфора, кальция; лимонная, салициловая, борная и другие кислоты; большое количество аскорбиновой кислоты (витамин *C*), каротин, витамины *B*, *P*, а также пектины, эфирные масла, клетчатка и другие минеральные и биологически активные вещества.

Высота деревьев яблони при естественном произрастании достигает 15-20 метров, а кустарников 0,5-3 метра и имеют довольно мощную корневую систему, зачастую превосходящую диаметр кроны в 2 раза. В молодом возрасте основная масса корней яблони в лесостепной зоне юга Западной Сибири сконцентрирована в слое почвы глубиной до 30-40 см. В возрасте 5-10 лет и 8-10 лет корни сосредоточены на глубине до 50-60 см и 70 см соответственно (Гончарова, 2002).

Наиболее активный рост корней яблони происходит при положительной температуре в диапазоне 7-20 °С. В условиях Сибири на состояние плодовых садов значительное влияние оказывают морозы, когда зимние минимумы температуры в сочетании с другими климатическими факторами могут способствовать повреждению деревьев.

Груша самая распространенная после яблони культура, плоды которой содержат до 13% сахаров; 0,2% кислот; 0,1% дубильных веществ; 1,5% клетчатки. Сибирские сорта груши значительно превосходят европейские по содержанию Р-активных соединений, хлорогеновой кислоты и атрибутина (Пучкин, 2003).

Основная масса корней груши сосредоточена на глубине 20-100 см, при этом скелетные корни могут проникать на глубину до 5 метров. Оптимальная температура почвы для роста корней находится в диапазоне 10-20 °С, а начало их роста зафиксировано при температуре 6-7 °С, при этом корни начинают расти на 15 дней раньше надземных вегетативных органов.



Груша достаточно требовательная к влаге культура. Это особенно выражено на ранних стадиях развития дерева, когда корневая система еще слабо развита. В более позднем возрасте деревья груши получают необходимую влагу из нижних почвенных слоев благодаря глубоко проникающим корням. Влажность почвы также повышает зимостойкость дерева, поэтому после засушливого летне-осеннего периода необходим позднеосенний влагозарядковый полив.

На урожайность груши значительное влияние оказывает освещенность, поэтому она требует солнечного местоположения и при недостаточном уровне инсоляции резко снижает урожайность.

Биологические особенности рассмотренных плодовых культур в совокупности с почвенно-климатическими свойствами региона сказались на специфике мероприятий гидромелиоративного воздействия на плодовый сад с целью повышения его продуктивности при минимизации негативных последствий.

### **3.4. Почвенно-гидрофизические условия произрастания плодовых культур**

Почвенно-гидрофизические факторы оказывают значительное влияние развитие и рост растений. «С влагой связаны важнейшие биологические и абиотические процессы, протекающие в почве и определяющие развитие почвообразования и плодородия. Черноземы Приобского плато Алтайского края в связи с резкой континентальностью климатических условий отличаются небольшой мощностью, сравнительно невысокой гумусностью, слабой водопроходной структурой (Бурлакова, 1984)».

Исследуемая почва: чернозем выщелоченный среднесплодный малогумусный среднесуглинистый.

Морфологическое описание разреза:

Горизонт А – 0-20 см – сухой, темно-серый, слабоуплотненный, пронизан корнями, среднесуглинистый, тонкопористый, зернисто-комковатый, гумусовые вещества, в нижней части кремнезем, переход ясный.

Горизонт АВ – 20-50 см – свежий, среднесуглинистый, уплотненный, комковатый, отдельные корни, в том числе древесных растений, гумусовые вещества, кремнезем, буро-серый, переход постепенный.

Горизонт В – 50-97 см – неоднородный, бурый, в верхней части буро-серый, гумусовые затеки, единичные корни, свежий, среднесуглинистый, уплотнен, комковатый и ореховатый, переход резкий по вскипанию.

Горизонт Ск > 97 см – влажный, светло-бурый, палевый, комковатый и ореховатый, тяжелосуглинистый, карбонаты, псевдомицелий.

Исследованный чернозем выщелоченный имеет среднесуглинистый гранулометрический состав (рис. 1).

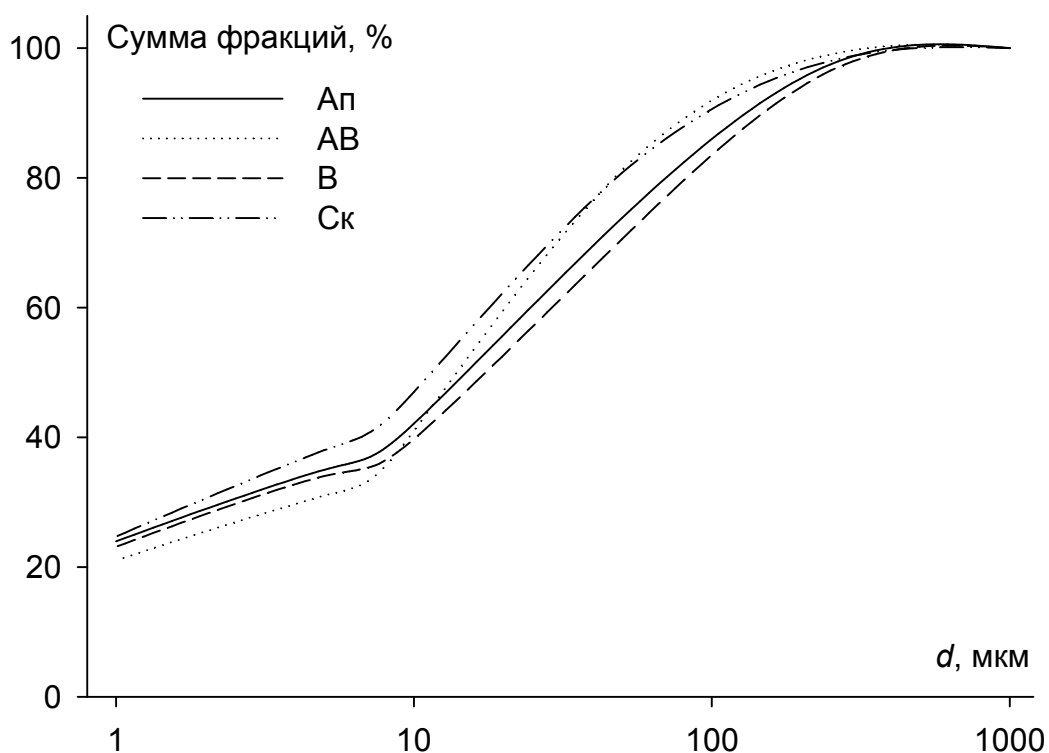


Рис. 1. Интегральное распределение гранулометрических фракций по размерам чернозема выщелоченного среднесуглинистого под яблоневыми культурами.

Из рисунка видно, что чернозем выщелоченный имеет среднесуглинистый, близкий к тяжелосуглинистому иловато-

крупнопылеватый гранулометрический состав. Плавное нарастание интегральной кривой показывает однородность гранулометрического состава почвенных горизонтов по фракциям. Содержание глинистых частиц (10 мкм) в горизонте Ап составляет 42 %, песчаной фракции 26 %. Доля крупной пыли составляет 32 %, что говорит о преобладании данной фракции над остальными, что объясняется представленными лессовидными суглинками в почвообразующих породах, для которых характерно высокое содержание данной фракции. В составе крупных фракций (0,01-1,00 мм) преобладают кварц (39 %) и полевые шпаты (26 %). Исследованный чернозем содержит значительное количество илистых частиц (от 21 до 28 %), состоящих из гидрослюды и монтмориллонита. Значительное содержание крупной пыли определяет слабую водопроницаемость (18 мм за 1 час) чернозема на опытном участке (Михайлова, 2005). Почвообразующая порода по гранулометрическому составу относится к тяжелосуглинистой, в основном за счет меньшего содержания фракции мелкого песка и повышенного – мелкой пыли, тем самым отличает её от других почвенных горизонтов.

Благоприятное влияние на водно-физические свойства почв оказывает водопрочная пористая микроструктура с наиболее ценными микроагрегатами (0,25-0,01 мм). В таблице 1 приведены результаты проведенного микроагрегатного анализа чернозема выщелоченного по генетическим горизонтам.

Таблица 1

Микроагрегатный состав чернозема выщелоченного (по Н.А. Качинскому)

Горизонт	Глубина взятия образца, см	Содержание фракций от абсолютно-сухой почвы, %						
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,010-0,005	0,005-0,001	< 0,001	Фактор дисперсности, %
А	0-20	1,26	25,13	65,01	4,36	2,42	1,79	8,6
АВ	20-50	1,14	21,27	71,82	2,17	2,36	1,24	5,9
В	50-97	1,85	34,12	57,31	3,53	2,01	1,16	4,3
С <sub>к</sub>	> 97	2,01	22,16	64,84	4,15	4,26	2,58	10,2

Микроагрегаты размером 0,010-0,005 мм затрудняют водо- и воздухопроницаемость, способствуют повышению испаряющей способности почв. Как видно из таблицы 2, основная доля представлена наиболее ценными в агрономическом отношении микроагрегатами, при этом большее содержание зафиксировано для размеров 0,05-0,01 мм. С глубиной наблюдается перераспределение этих фракций, так в горизонте АВ отмечено увеличение фракций 0,05-0,01 мм в сравнение с пахотным горизонтом. Количество менее ценных частиц в черноземах незначительно (от 4 до 8 %) и они представлены размером 0,010-0,001 мм. Результаты микроагрегатного анализа свидетельствуют о высокой степени агрегирования изучаемого чернозема выщелоченного.

В гумусовом горизонте величина фактора дисперсности (по Н.А. Качинскому) чернозема выщелоченного составляет 6-8 %, что указывает на его высокую микроструктурность, в то время как горизонт С<sub>к</sub> менее агрегирован (микроструктура менее прочная), коэффициент дисперсности достигает 10 %. Л.М. Бурлакова (1988) отмечала, что хорошая способность к микроагрегированию черноземов выщелоченных определяется значительным количеством ила (Бурлакова и др., 1988).

Плотность сложения чернозема с глубиной постепенно возрастает с  $1,05 \text{ г/см}^3$  в пахотном горизонте до  $1,41 \text{ г/см}^3$  в почвообразующей породе. По содержанию гумуса в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте исследуемый чернозем относится к малогумусным (5,3 %), при этом мощность данного горизонта (A+AB) составляет 50 см. По мере углубления содержание гумуса убывает до 1,0 % в иллювиальном горизонте, с дальнейшим уменьшением его до 0,6 %.

Во всем почвенном профиле, в составе поглощенных катионов, преобладает кальций. Реакция почвенного раствора для верхних горизонтов нейтральна и составляет 6,3-6,7, в то время как с увеличением глубины реакция становится слабощелочной:  $pH = 7,6-8,0$  (Гефке, 2007).

Отмеченные особенности распределения гранулометрических элементов, количества гумуса и плотности по почвенным горизонтам определяют характер дифференциации гидрофизических характеристик почвенной толщи чернозема.

К гидрофизическим функциям (характеристикам) почв относятся зависимость капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги ( $P_{к-с}$ ) от ее содержания в почве, обычно называемая основной гидрофизической характеристикой (ОГХ), и зависимость коэффициента влагопроводности ( $K_{вл}$ ) от влажности почвы или давления почвенной влаги. Теоретическому обоснованию структурно-функционального значения этих основных гидрофизических функций посвящены работы А.Д. Воронина (1986), А.М. Глобуса (1987), И.И. Судницына (1979) и др. Для расчетных методов определения основных гидрофизических функций часто используют традиционные гидрологические свойства, например, коэффициент фильтрации. Методам определения коэффициента фильтрации посвящено большое количество работ, обзор которых приведен в работе (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Исследования гидрофизических свойств почвенного профиля проводились на образцах ненарушенного сложения, имеющих форму

цилиндра, которые отбирались из стенки почвенного разреза с различных глубин, что позволило выявить распределение гидрофизических характеристик в почвенном профиле. При этом изучалось изменение капиллярно-сорбционного давления и коэффициента влагопроводности в зависимости от объемной влажности почвы, а также зависимость коэффициента влагопроводности от капиллярно-сорбционного давления.

В данной работе определены ветви иссушения гистерезисной петли ОГХ, т.к. в естественных условиях в почвах обычно быстро протекающий процесс их увлажнения (при осадках или поливах) сменяется сравнительно длинным периодом иссушения (Воронин, 1986). Рисунок 4 позволяет провести сравнение гидрофизических свойств отдельных почвенных горизонтов (рис.4).

Области перехода воды из одной категории в другую (по А.Д. Воронину) зависят от физических и физико-химических свойств почв. Величины соответствующих им капиллярно-сорбционных давлений, расположенных на пересечении ОГХ и секущих Воронина, при переходе от материнской породе к пахотному горизонту по мере увеличения содержания гумуса и уменьшения плотности сложения и, несмотря на утяжеление гранулометрического состава, смещаются в сторону увеличения. При этом происходит смещение кривых ОГХ вправо, в область больших влажностей. Вид кривых водоудерживания среднесуглинистых почв имеют выположенную S-образность с дифференциацией по горизонтам в области капиллярной и гравитационной влаги (рис.5), что объясняется изменением содержания гумуса и плотности сложения в совокупности с изменением содержания гранулометрических фракций по профилю.

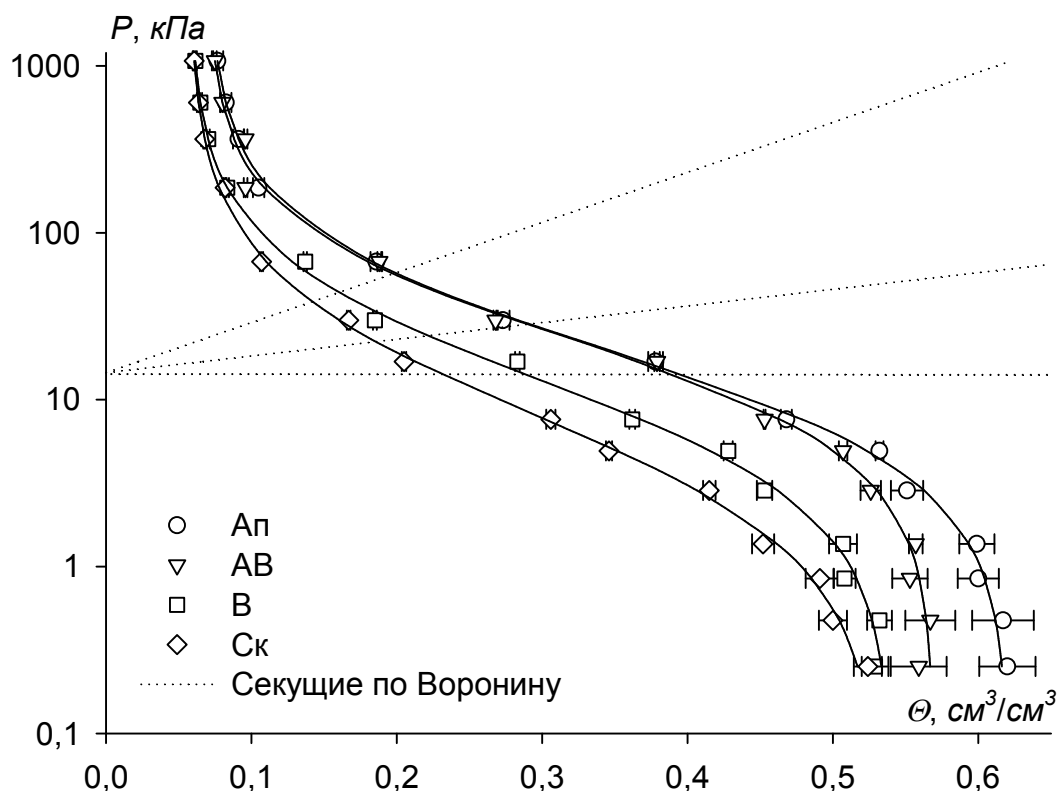


Рис.5. Основная гидрофизическая характеристика чернозема выщелоченного под яблоневыми культурами. Сплошная линия – аппроксимация ван Генухтена.

На рисунке видно, что максимальная водоудерживающая способность характерна для верхнего пахотного горизонта, а его кривая водоудерживания в области гравитационной влаги расположена на некотором расстоянии от переходного к иллювиальному горизонту. Однако в капиллярной и пленочно-капиллярной области кривые водоудерживания горизонтов Ap и AB пересекаются и имеют одинаковые значения давления почвенной влаги, что негативно сказывается на накоплении влаги в пахотном горизонте. Количественная оценка этого будет дана ниже при анализе поровой структуры и энергии водоудерживания. Вниз по профилю почвы кривые ОГХ смещаются в сторону меньших влажностей, не пересекаясь друг с другом вплоть до перехода пленочно-капиллярной малоподвижной влаги в пленочную. В целом кривые водоудерживания чернозема выщелоченного в условиях сада имеют выраженную S-образность с дифференциацией по профилю вплоть до верхнего предела иссушения (1000 кПа) с перегибом в

области давления барботирования, имеющей довольно широкий диапазон (1-10 кПа) по сравнению с более легкими почвами (Болотов с соавт., 2014).

Следует отметить, что с помощью подхода А.Д. Воронина выявления критических предельно равновесных состояний для средне- и тяжелосуглинистых почв можно достаточно точно оценить переходы влаги из одной категории в другую (Воронин, 1986; Смагин с соавт., 1999; Смагин, 2003). Для исследуемого чернозема из полученной ОГХ рассчитаны давления, соответствующие критическим состояниям влаги: капиллярной влагоемкости (*KB*, верхний предел пластичности)  $P_{кв}$ , максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкости (*МКСВ*)  $P_{мксв}$ , максимальной молекулярной влагоемкости (*ММВ*, нижний предел пластичности)  $P_{ммв}$  значения которых представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Критические состояния влаги чернозема выщелоченного под плодовыми культурами

Гор	<i>KB</i>		<i>МКСВ</i>		<i>ММВ</i>	
	$P_{кв}$ , кПа	$\theta_{кв}$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$P_{мксв}$ , кПа	$\theta_{мксв}$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$P_{ммв}$ , кПа	$\theta_{ммв}$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>
Ап	14,7	0,395	28,6	0,292	57,7	0,200
АВ	14,7	0,387	28,3	0,290	57,4	0,198
В	14,7	0,290	24,2	0,223	44,1	0,161
Ск	14,7	0,232	22,3	0,186	38,6	0,142

Максимальные значения критических состояний влаги чернозема выщелоченного присуще гор. Ап и АВ, при этом они практически не отличаются между собой, т.к. гранулометрический состав данных горизонтов однороден по всем фракциям и имеет их одинаковые значения. Далее по профилю значения критических состояний влаги уменьшаются.

Полученные экспериментальные ОГХ (кривые водоудерживания)  $P(\text{кПа}) = f(\theta)$  для основных диагностических горизонтов чернозема



выщелоченного под ягодными культурами в условиях Алтайского Приобья аппроксимированы функцией ван Генухтена в программном пакете *RETSC* (van Genuchten et al., 1991). Значения параметров, полученных при аппроксимации, приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Гидрофизические параметры ван Генухтена чернозема выщелоченного под яблоневыми насаждениями.

Гори- зонт	$\theta_r,$ $\text{см}^3/\text{см}^3$	$\sigma_{\theta_r},$ $\text{см}^3/\text{см}^3$	$\theta_s,$ $\text{см}^3/\text{см}^3$	$\sigma_{\theta_s},$ $\text{см}^3/\text{см}^3$	$\alpha,$ $1/\text{см}$	$\sigma_\alpha,$ $1/\text{см}^3$	$n, (-)$	$\sigma_n$	$K_r,$ $\text{см}/\text{сут}$	$\sigma_{K_r},$ $\text{см}/\text{сут}$
Ап	0,070	0,011	0,610	0,035	0,013	0,004	1,61	0,12	34,7	0,9
АВ	0,069	0,011	0,562	0,028	0,010	0,003	1,66	0,09	33,1	0,8
В	0,058	0,010	0,528	0,021	0,023	0,008	1,61	0,05	27,3	0,6
Ск	0,057	0,009	0,512	0,022	0,033	0,011	1,57	0,04	14,9	0,7

Особенность распределения параметров ван Генухтена по профилю чернозема выщелоченного в условиях плодового сада показано на рис.6.

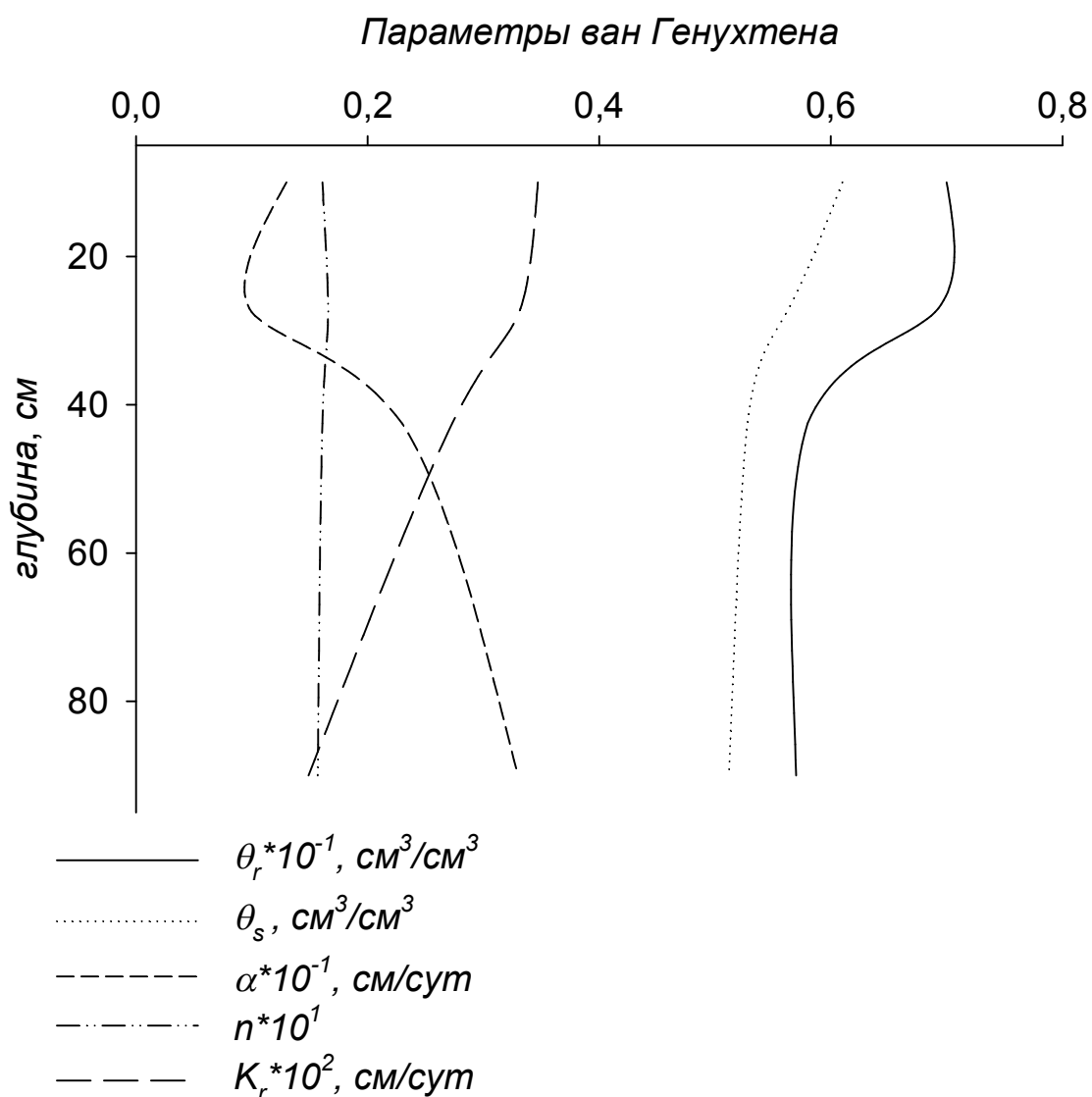


Рис. 6. Профильное распределение параметров ван Генухтена для чернозема выщелоченного в условиях плодового сада.

Как видно из рисунка черноземы Алтайского Приобья имеют аккумулятивный тип распределения параметров  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  и  $K_r$  по профилю. Параметр  $\alpha$ , обратный величине давления барботирования (входа воздуха) закономерно увеличивается по глубине. Однако в подпахотном горизонте происходит его уменьшение по сравнению с пахотным. Вероятно, это связано с формированием плужной подошвы в междурядьях, и при уплотнении почвы давление барботирования возрастает, а параметр  $\alpha$  уменьшается.

Подводя итог, можно сделать вывод о приемлемых почвенно-гидрологических условиях произрастания плодовых культур. Исследуемый

чернозем имеет среднесуглинистый гранулометрический состав, хорошо структурированный, легко впитывает и удерживает влагу, что способствует созданию благоприятных условий для обеспечения растений влагой и воздухом. Содержание гумуса, одного из основных показателей почвенного плодородия, в почвах Алтайского Приобья достаточно для роста и развития плодовых культур. Полученные гидрофизические функции и параметры ван Генухтена-Муалема использованы в динамическом моделировании водного режима почв под яблоневыми культурами.

## **ГЛАВА IV. ВОДНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ПОД ПЛОДОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ**

### **4.1. Вероятность необходимости водных мелиораций в условиях плодового сада**

#### **4.1.1. Распределение продуктивных запасов влаги за вегетационный период в годы исследования**

«Совокупность физических процессов, вызывающих изменение количества воды в почвах во времени и в пространстве, называют водным режимом почв, каждый из этих процессов в отдельности называют элементами водного режима» (Роде, 1965). Этот режим является одним из важнейших факторов почвообразования и одним из главных условий почвенного плодородия. От содержания воды зависят технологические свойства почвы, физические, физико-химические и микробиологические процессы, обуславливающие трансформацию питательных веществ в почве. Недостаток и избыток почвенной влаги нарушает нормальное снабжение растений водой, питательными веществами и кислородом. Водный режим почвы определяется метеорологическими условиями, свойствами почвы, рельефом, характером растительного покрова, особенностями сельскохозяйственных культур и агротехникой. В процессе всего вегетационного периода растения непрерывно потребляют и расходуют большое количество воды, которое используется для создания органической массы (Ничипорович, 1963, 1965; Устенко, 1963; Алиев, 1971; Росс, 1972; Кружилин, 1976; Багров и Кружилин, 1980; Нерпин с соавт., 1981; Шумаков, 1983; Овчинников с соавт., 2004; Ахмедов с соавт., 2010; Григоров с соавт., 2010; Галиуллина, 2015).

Общее количество доступной влаги в почве является абсолютной величиной, определяющей, сколько влаги потенциально культура может абсорбировать из почвы при влажности почвы в диапазоне от наименьшей влагоёмкости и влажностью устойчивого завядания.

Наименьшая влагоёмкость для песчаных почв достигается спустя всего несколько часов после насыщения почвы от дождя или полива, но в глинистых почвах отток воды настолько замедлен, что могут понадобиться дни для того, чтобы вода стекла вглубь почвенного профиля. Содержание влаги в почве при котором растение погибает, в значительной мере зависит от его ксероморфного развития, поэтому обе точки содержания влаги в почве определяются конкретными матричными потенциалами. Наименьшая влагоёмкость в почвах зон с умеренными климатическими условиям обычно соответствует величина  $pF=1,8$ , содержанию влаги в точке устойчивого завядания соответствует величина  $4,2pF=1500 \text{ кПа}$  (Шеин, 2005; Шеин, Гончаров, 2006). Влага, содержащаяся в почве между двумя этими точками является доступной почвенной влагой и обычно выражается величиной в % от объёма или в мм/м слоя почвы.

Для обоснования необходимости водных мелиораций в условиях плодового сада нами были определены величины продуктивного влагозапаса в течение вегетационных периодов 2012-14 в НИИСС им. М. А. Лисавенко. Однако, из-за сильной изменчивости погодных условий для получения статистически значимых результатов ряды наблюдений должны быть не менее 10...15 лет. Такие длительные наблюдения организовать трудно, поэтому нами были получены значения продуктивных влагозапасов в результате численного эксперимента в среде *Hydrus* за 2004-2011 вегетационные периоды. Таким образом, был сформирован массив подекадных значений влагозапасов за 2004-2014г.

На рисунках 7-9 отображено распределение продуктивных влагозапасов в 60 см и метровом слое чернозема выщелоченного под яблоневыми и грушевыми насаждениями по вегетационным периодам 2012-2014. Оптимальная величина продуктивных запасов влаги для этих культур в условиях Алтайского Приобья равняется 148 мм.

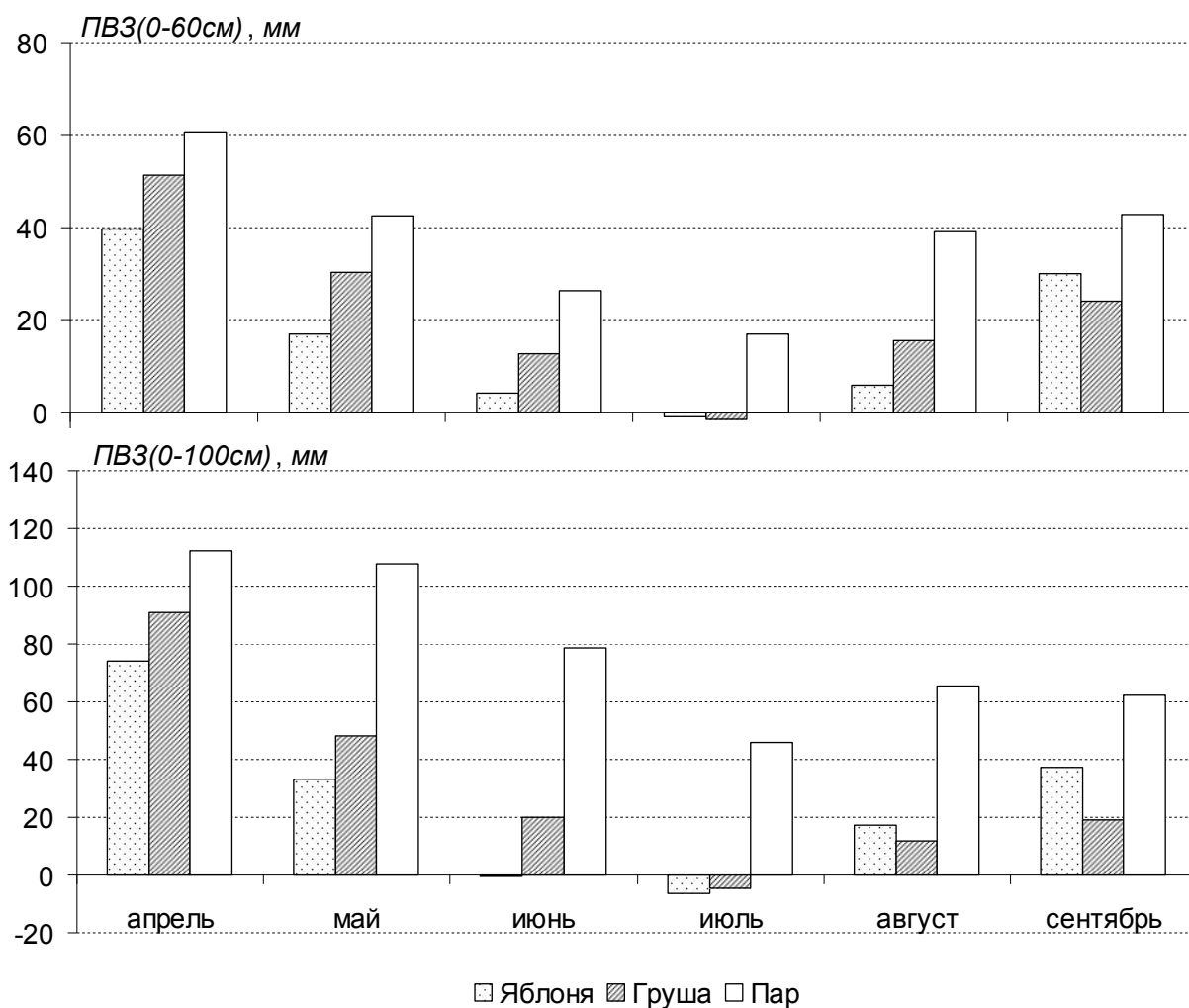


Рис.7. Продуктивные запасы влаги (ПВЗ) в слое 0-60 см и 0-100 см за вегетационный период 2012г.

Из рисунка видно, что в 2012 году максимальные величины продуктивных почвенных влагозапасов под яблоней и грушей были отмечены в апреле после схода снега, которые все же были намного ниже оптимальных. Дальнейшее иссушение почвы привело к дефициту продуктивных влагозапасов под яблоней в июне 0,5 мм, в июле 6,2 мм, под грушей 4,5 мм в июле. Т.е. в течение этих месяцев влага в слое 0-100 см была недоступна для растений, и они испытывали водный стресс, негативно отразившийся на формировании плодов. В течение всего вегетационного периода 2012 в пару значения влагозапасов были больше чем под плодовыми насаждениями.

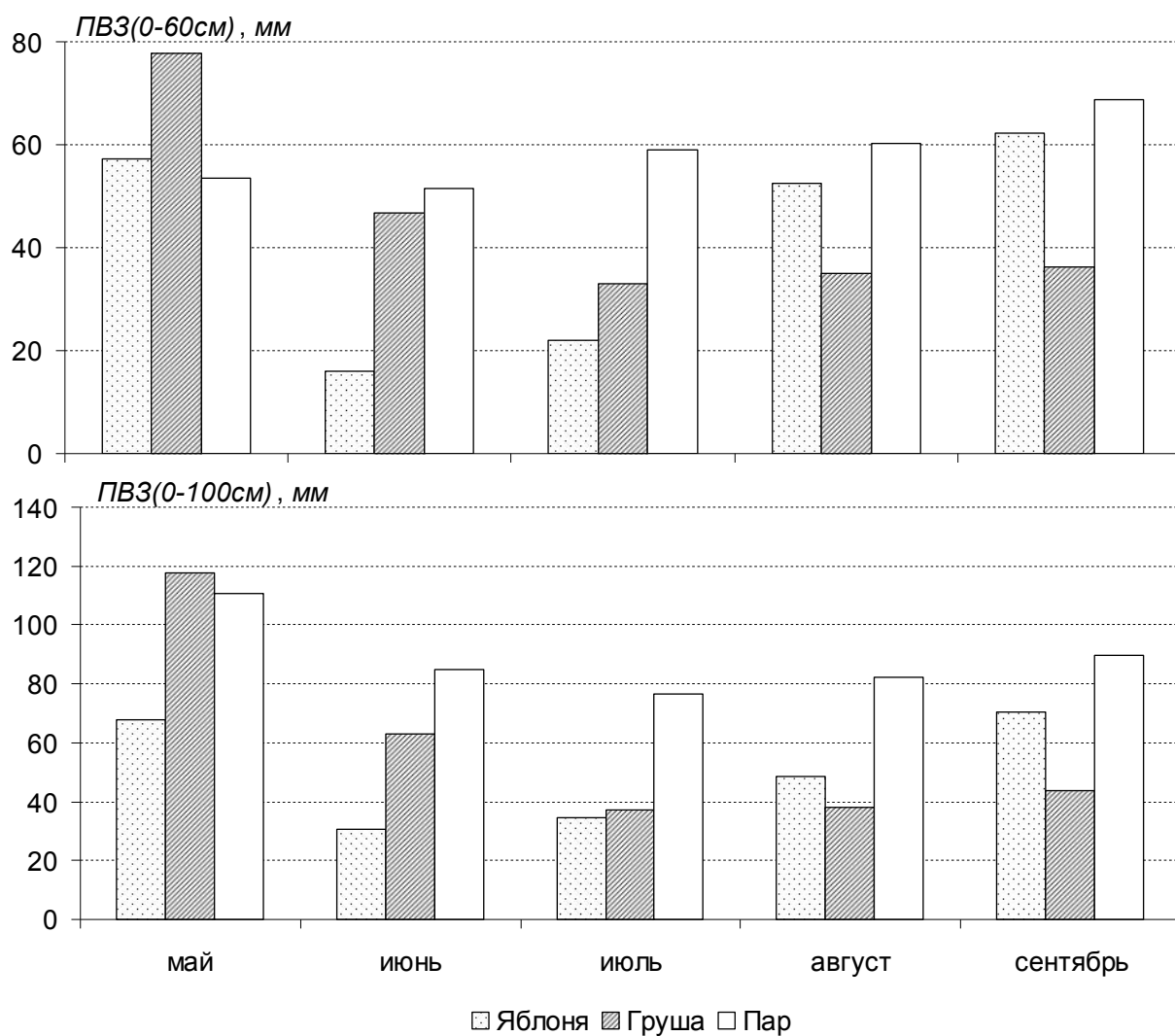


Рис.8. Продуктивные запасы влаги (ПВЗ) в слое 0-60 см и 0-100 см за вегетационный период 2013г.

В 2013г на момент продолжения вегетации максимальные влагозапасы были накоплены под грушей, чем под яблоней, сказалось неравномерное накопление снега в кварталах сада. Несмотря на то, что максимум под грушей составлял 118 мм в апреле этого все равно недостаточно для максимального формирования урожая. В результате того, что за предыдущий осенне-зимний период было накоплено значительное количество осадков культуры не испытывали дефицита влаги, но при этом значения влагозапасов были в 2-3 раза ниже оптимальных.

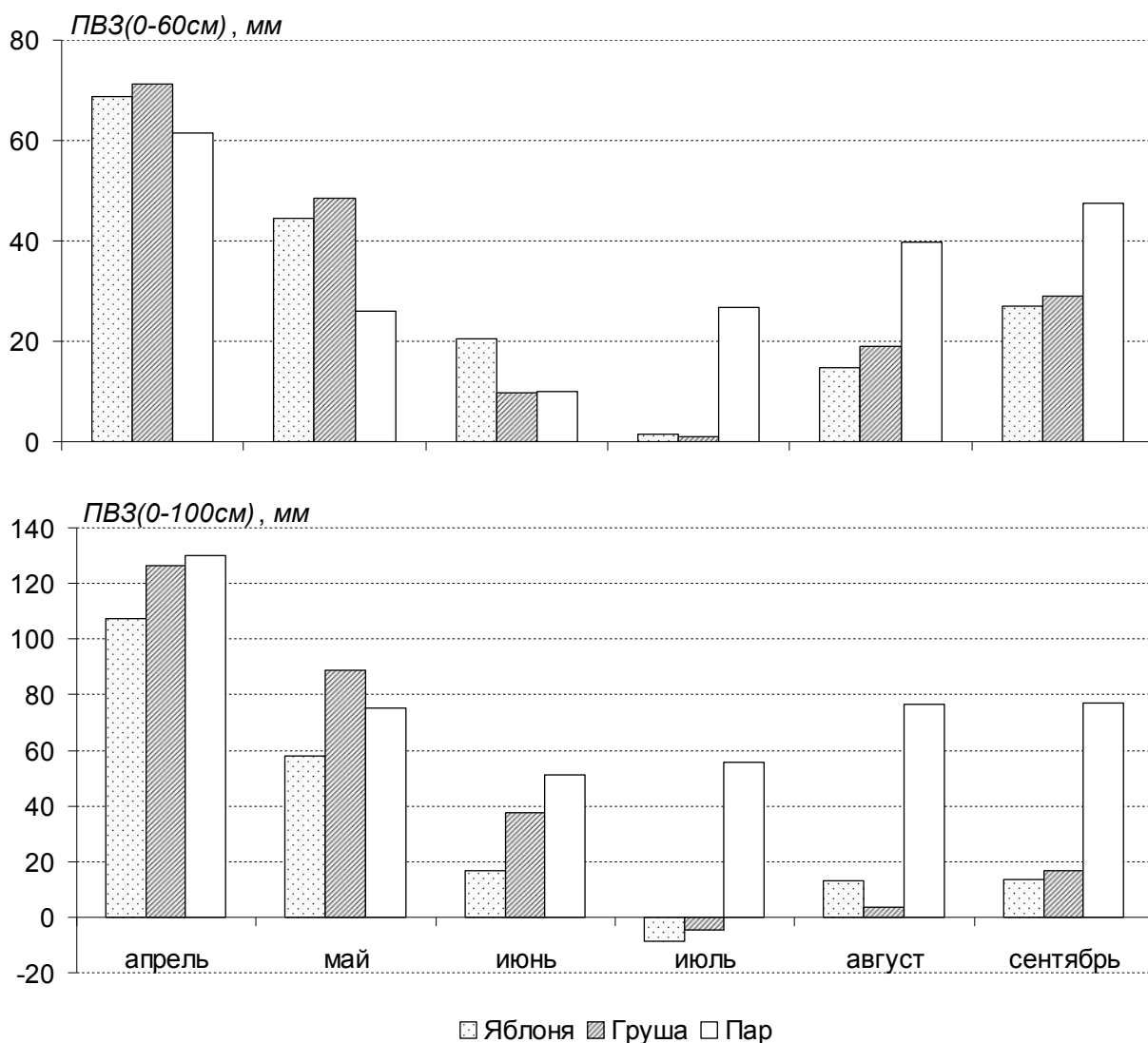


Рис.9. Продуктивные запасы влаги (ПВЗ) в слое 0-60 см и 0-100 см за вегетационный период 2014г.

В 2014г, несмотря на высокие весенние влагозапасы, летом сформировался их дефицит под яблоней в июле 8,7 мм, под грушей 4,4 мм. Пар также как и в предыдущие годы выполнял влагоаккумулирующую функцию, достигая максимальных значений продуктивных влагозапасов 130 мм в апреле.

Резюмируя, можно отметить, что независимо от обеспеченности влагой по годам величины влагозапасов под яблоней в весенне-летний период имеют меньшие значения, чем под грушой, в то время как осенью эти значения под яблоней превышают аналогичные параметры под грушей. Поэтому грушевые насаждения в условиях Алтайского Приобья на



формирование вегетативной массы потребляют больше влаги в течение вегетационного периода, чем яблоневые.

#### **4.1.2. Распределение вероятностей продуктивных запасов влаги и температуры почвы в условиях плодового сада**

При описании природно-климатических условий и определении неопределенностей, вызванных климатическими факторами, как правило, применяют вероятностно-статистический подход, т.к. происхождение природных процессов является вероятностным. Климатологические ряды состояются из членов, которые являются или результатами непосредственных наблюдений за отдельные временные интервалы. Считается, что наблюдаемый ряд является реализацией случайного процесса и отражает его характерные особенности, поэтому суть обработки климатологических данных заключается в получении основных вероятностных закономерностей, характерных для всего процесса, на основании имеющегося временного ряда.

«Для получения исчерпывающей и точной информации о вероятностных характеристиках изучаемого процесса необходимо иметь бесконечно большое число результатов наблюдений. Такое гипотетическое множество принято называть генеральной совокупностью. На практике же имеется лишь ограниченное число наблюдений. Ряд однородных наблюдений называется выборкой. Выборка должна отражать свойства генеральной совокупности с приемлемой точностью. Важным этапом обработки рядов метеорологических данных является получение распределения повторяемостей значений метеорологических величин» (Дроздов и др., 1989).

Сформированный массив подекадных значений влагозапасов за десятилетие позволил нам оценить вероятность необходимости водных мелиораций в условиях плодового сада Алтайского Приобья с помощью вероятностно-статистического подхода. Результаты представлены на рис. 10-

11 в виде гистограмм распределения вероятностей продуктивных запасов влаги (0-100 см).

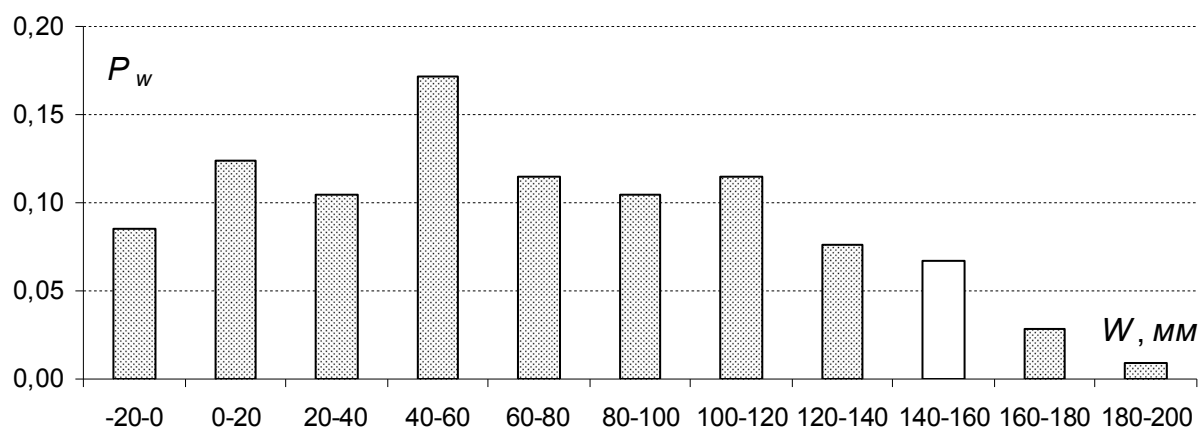


Рис.10. Распределение вероятностей ( $P_w$ ) продуктивных запасов влаги ( $W$ ) в слое (0-100 см) в черноземе под яблоневыми насаждениями за 2004-2014гг ( $n = 450$ ).

Из диаграммы видно, что значения оптимальных значений продуктивных влагозапасов (диапазон 140-160 мм, столбец без штриховки;  $W_{opt} = 148$  мм) в слое 0-100 см составляет незначительную долю, а именно 0,67 лет из 10 (вероятность  $P = 0,067$ ), что наглядно доказывает необходимость проведения оросительных мелиораций.

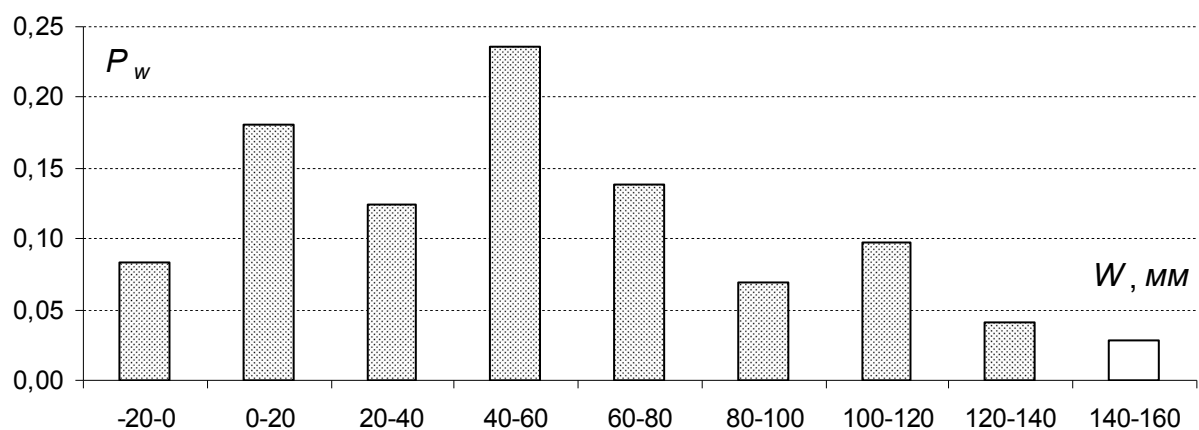


Рис.11. Распределение вероятностей ( $P_w$ ) продуктивных запасов влаги ( $W$ ) в слое (0-100 см) в черноземе под грушевыми насаждениями за 2004-2014гг ( $n = 450$ ).

Для груши значения оптимальных значений продуктивных влагозапасов (диапазон 140-160 мм, столбец без штриховки) в слое 0-100 см составляет незначительную долю, а именно 0,28 лет из 10 (вероятность  $P =$

0,028) (рис.11). Наиболее вероятные значения продуктивных влагозапасов под яблоней и грушей располагаются в интервале 40-60 мм, что явно недостаточно для получения высоких и устойчивых урожаев.

Таким образом, влагообеспеченность чернозема выщелоченного плодового сада не позволяет получать полноценные урожаи фруктов в условиях Алтайского Приобья. Так в 0,63 лет и 0,28 лет из 10 яблоневые и грушевые насаждения соответственно испытывают дефицит влагозапасов.

Также нами была проанализирована теплообеспеченность почвы на глубинах 20 и 50 см по годам исследования в совокупности с модельными значениями температур за 2004-2011 вегетационные периоды (рис.12-15).

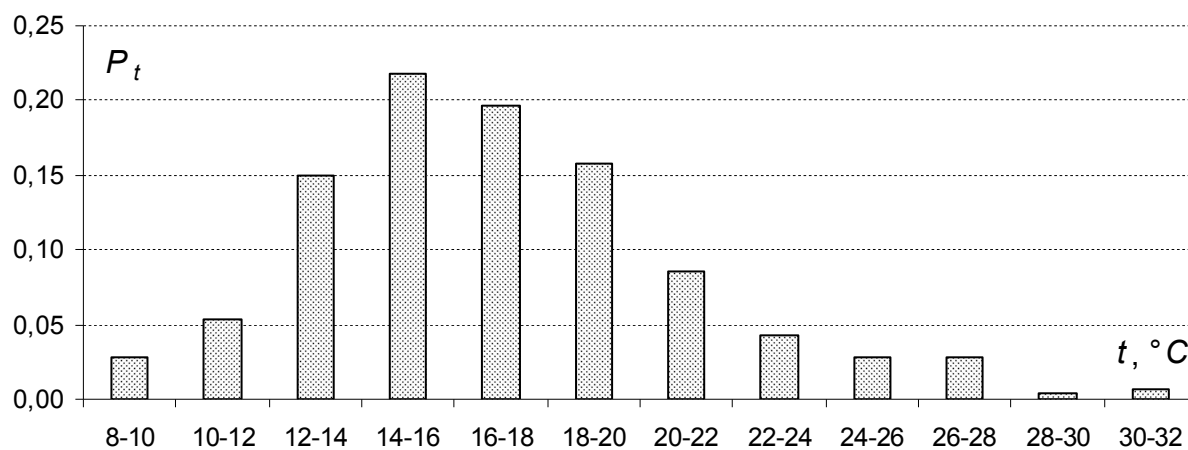


Рис.12. Распределение вероятностей ( $P_t$ ) температуры почвы на глубине 20 см в черноземе выщелоченном под яблоневыми насаждениями за вегетационные периоды 2004-2014гг ( $n = 450$ ).

Из рисунка видно максимальная вероятность температур на глубине 20 см расположена в диапазоне 15-20 °C и равняется 0,44. Данный диапазон температур является оптимальным для роста и развития яблоневых и грушевых культур.

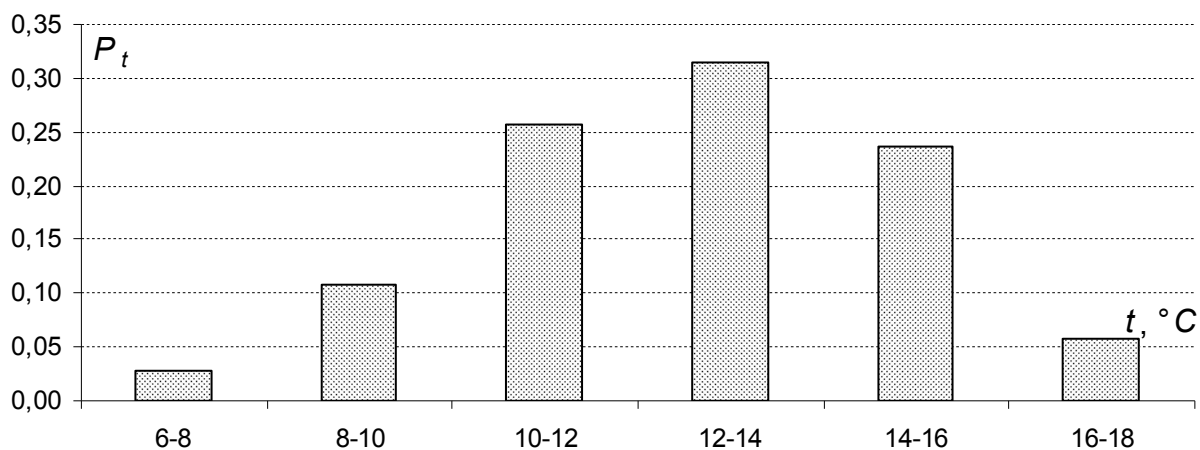


Рис.13. Распределение вероятностей ( $P_t$ ) температуры почвы на глубине 50 см в черноземе выщелоченном под яблоневыми насаждениями за вегетационные периоды 2004-2014гг ( $n = 450$ ).

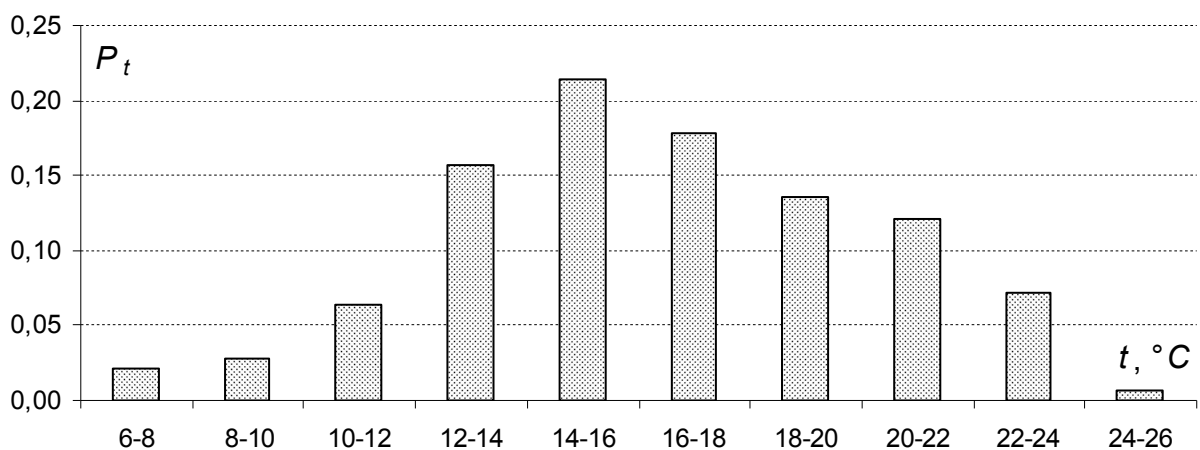


Рис.14. Распределение вероятностей ( $P_t$ ) температуры почвы на глубине 20 см в черноземе выщелоченном под грушевыми насаждениями за вегетационные периоды 2004-2014гг ( $n = 450$ ).

Разброс температур почвы под грушей меньше, чем у яблони, т.к. в выборку были включены яблони разных возрастов, под которыми температурный режим складывался по-разному.

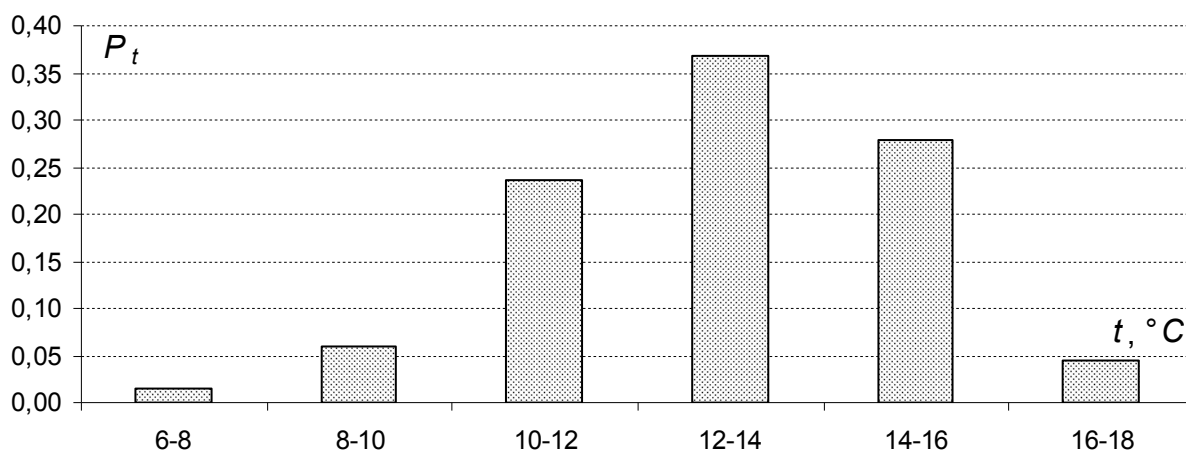


Рис. 15. Распределение вероятностей ( $P_t$ ) температуры почвы на глубине 50 см в черноземе выщелоченном под грушевыми насаждениями за вегетационные периоды 2004-2014гг ( $n = 450$ ).

На глубине 50 см наиболее вероятные температуры почвы (12-14 °C ) несколько ниже оптимальных значений, а так как основная доля корней плодовых культур расположена в слое 20-60 см, то для обеспечения высоких урожаев фруктов необходимо предусмотреть подогрев поливной воды, например в прудах-накопителях.

#### **4.1.3. Формирование сценариев изменения климатических факторов.**

Учитывая, что природные факторы являются вероятностными величинами и в связи с невозможностью точно спрогнозировать изменения матожидания, воспользуемся сценарным подходом с формированием матрицы сценариев.

Матрицу, где продуктивные влагозапасы и температуры изменяются на 50 % с шагом  $\pm 0,1$  можно представить в следующем виде (табл.4):

Пример матрицы сценариев изменения климата для гидротермических условий.

0,5W 0,5t	0,6W 0,5t	0,7W 0,5t	0,8W 0,5t	0,9W 0,5t	W 0,5t	1,1W 0,5t	1,2W 0,5t	1,3W 0,5t	1,4W 0,5t	1,5W 0,5t
0,5W 0,6t	0,6W 0,6t	0,7W 0,6t	0,8W 0,6t	0,9W 0,6t	W 0,6t	1,1W 0,6t	1,2W 0,6t	1,3W 0,6t	1,4W 0,6t	1,5W 0,6t
0,5W 0,7t	0,6W 0,7t	0,7W 0,7t	0,8W 0,7t	0,9W 0,7t	W 0,7t	1,1W 0,7t	1,2W 0,7t	1,3W 0,7t	1,4W 0,7t	1,5W 0,7t
0,5W 0,8t	0,6W 0,8t	0,7W 0,8t	0,8W 0,8t	0,9W 0,8t	W 0,8t	1,1W 0,8t	1,2W 0,8t	1,3W 0,8t	1,4W 0,8t	1,5W 0,8t
0,5W 0,9t	0,6W 0,9t	0,7W 0,9t	0,8W 0,9t	0,9W 0,9t	W 0,9t	1,1W 0,9t	1,2W 0,9t	1,3W 0,9t	1,4W 0,9t	1,5W 0,9t
0,5W t	0,6W t	0,7W t	0,8W t	0,9W t	Wt	1,1W t	1,2W t	1,3W t	1,4W t	1,5W t
0,5W 1,1t	0,6W 1,1t	0,7W 1,1t	0,8W 1,1t	0,9W 1,1t	W 1,1t	1,1W 1,1t	1,2W 1,1t	1,3W 1,1t	1,4W 1,1t	1,5W 1,1t
0,5W 1,2t	0,6W 1,2t	0,7W 1,2t	0,8W 1,2t	0,9W 1,2t	W 1,2t	1,1W 1,2t	1,2W 1,2t	1,3W 1,2t	1,4W 1,2t	1,5W 1,2t
0,5W 1,3t	0,6W 1,3t	0,7W 1,3t	0,8W 1,3t	0,9W 1,3t	W 1,3t	1,1W 1,3t	1,2W 1,3t	1,3W 1,3t	1,4W 1,3t	1,5W 1,3t
0,5W 1,4t	0,6W 1,4t	0,7W 1,4t	0,8W 1,4t	0,9W 1,4t	W 1,4t	1,1W 1,4t	1,2W 1,4t	1,3W 1,4t	1,4W 1,4t	1,5W 1,4t
0,5W 1,5t	0,6W 1,5t	0,7W 1,5t	0,8W 1,5t	0,9W 1,5t	W 1,5t	1,1W 1,5t	1,2W 1,5t	1,3W 1,5t	1,4W 1,5t	1,5W 1,5t

Для проведения дальнейших расчетов необходимо в исходных данных изменить значения математического ожидания по водному и тепловому режимам ( $t_{cp}$ ,  $W_{cp}$ ) на заданный шаг. Нами рассматривались сценарии регулирования продуктивных влагозапасов +25%, +50%, +75%, +100%, +125%, +175% (соответствует оптимальному увлажнению) и -25%, -50%, -75%. Для температуры почвы + 10%, + 20%, + 30%, + 40%, + 50%. и - 10%, -

20%, - 30%, - 40%, - 50%. Расчет новой кривой распределения аналогичен расчету с исходными данными.

По результатам расчетов всех сценариев построены графики, на которые нанесены кривые распределения сценариев изменения климата для влагозапасов и температур соответственно (рис.16-19).

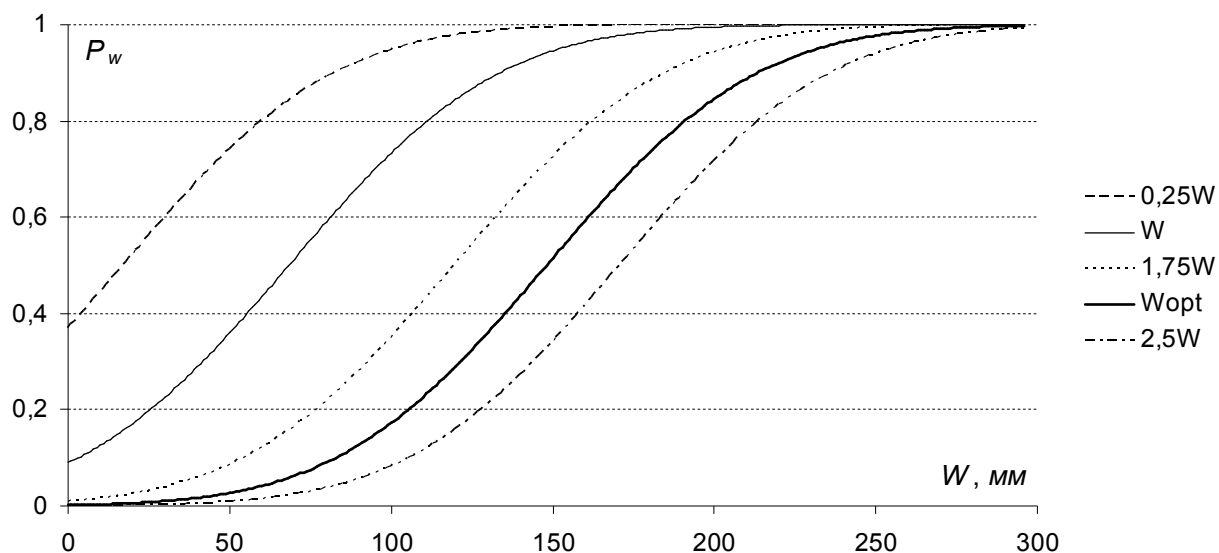


Рис. 16. Интегральные кривые обеспеченности продуктивных влагозапасов почвы под яблоней для различных сценариев изменения климата.

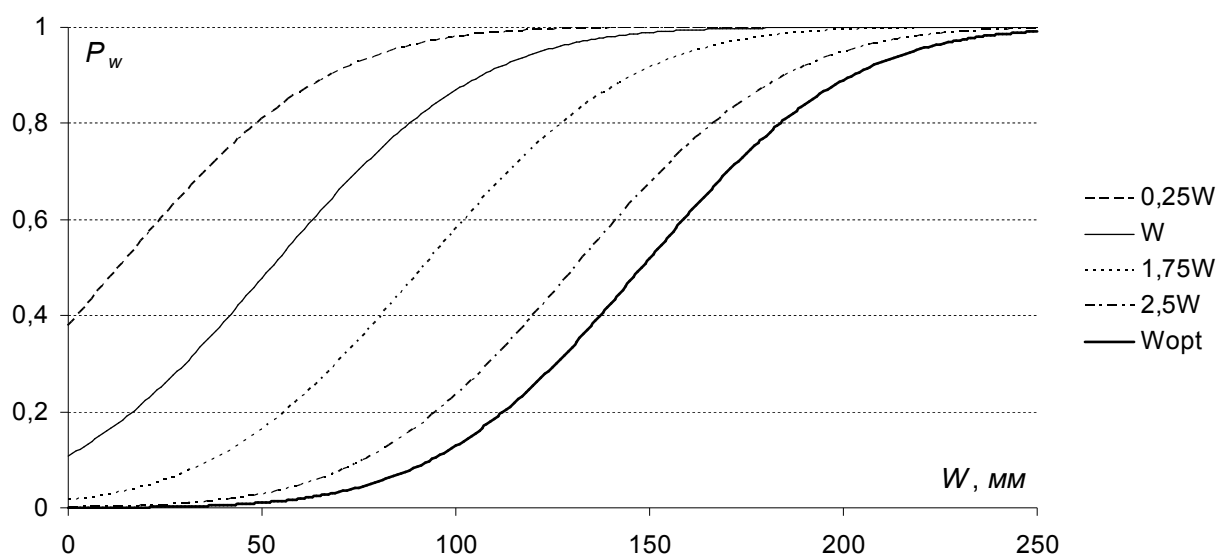


Рис. 17. Интегральные кривые обеспеченности продуктивных влагозапасов почвы под грушей для различных сценариев изменения климата.

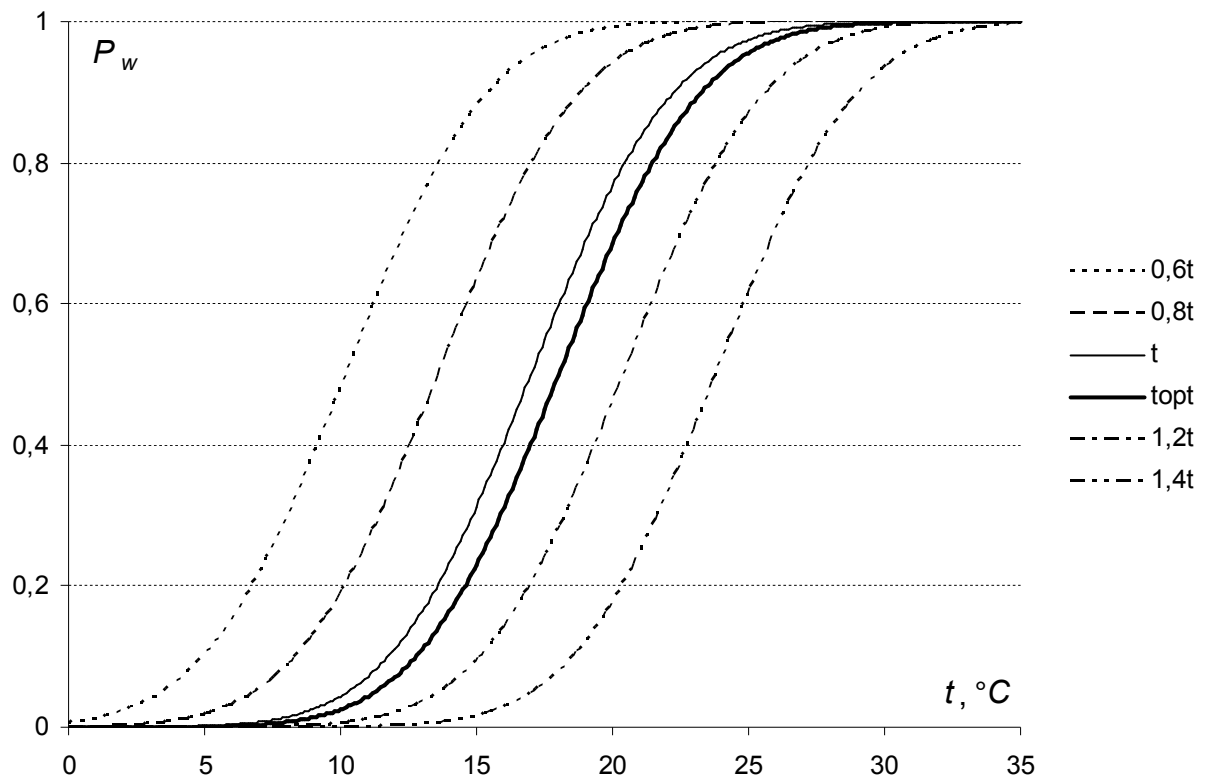


Рис. 18. Интегральные кривые обеспеченности температур почвы под яблоней для различных сценариев изменения климата.

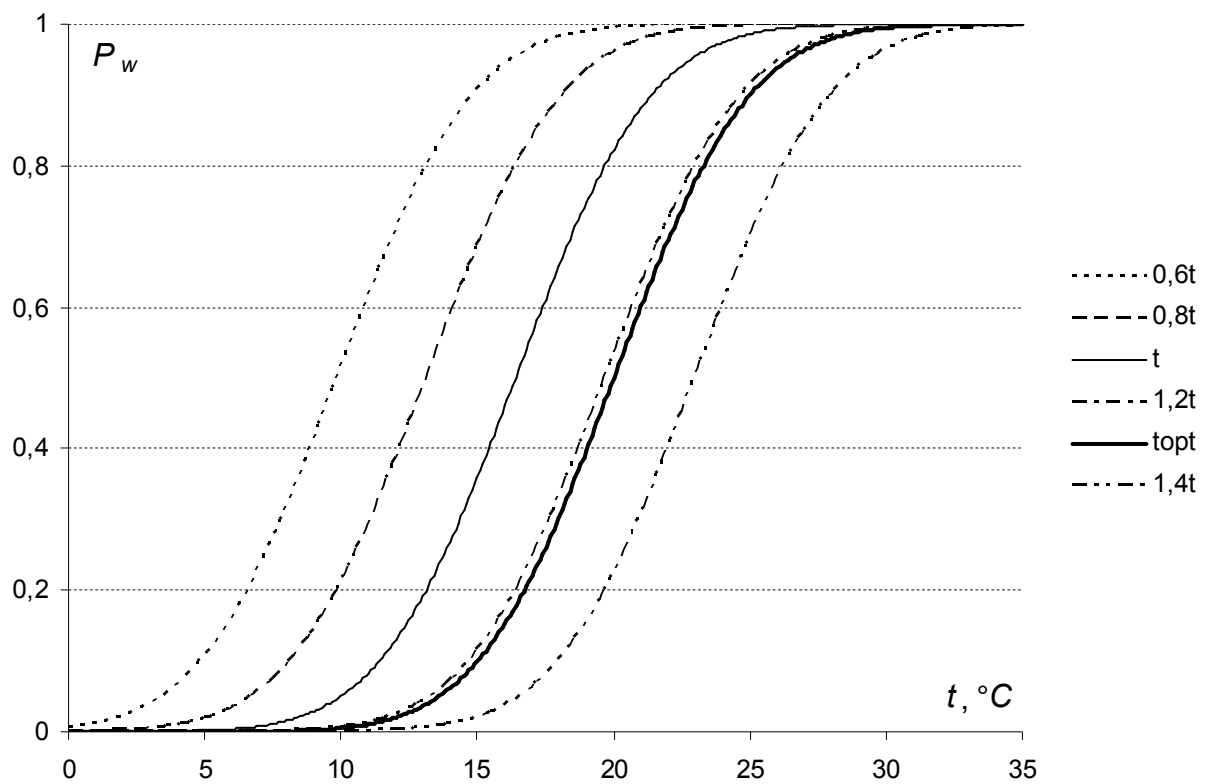




Рис. 19. Интегральные кривые обеспеченности температур почвы под грушей для различных сценариев изменения климата.

Из рисунков видно, что оптимальные кривые обеспеченности продуктивных влагозапасов почвы под яблоней и грушей находятся правее кривых обеспеченности среднегодовых влагозапасов, что говорит о недостаточной водообеспеченности садов в условиях Алтайского Приобья. Теплообеспеченность яблони можно считать приемлемой, в то время как средние температуры почвы под грушей в 1,2 раза меньше оптимальных значений.

Вероятности превышения заданных уровней продуктивности плодовых культур, при совместном учете водного и теплового режимов, приведены в таблицах 5-6.

Таблица 5

Вероятность превышения заданных уровней продуктивности яблони для водного и теплового режимов

Продуктивность $S >$	Вероятность $P$
0,1	0,64
0,2	0,54
0,3	0,45
0,4	0,37
0,5	0,30
0,6	0,23
0,7	0,17
0,8	0,11
0,9	0,05

Таблица 6

Вероятность превышения заданных уровней продуктивности груши для водного и теплового режимов

Продуктивность $S >$	Вероятность $P$
0,1	0,52
0,2	0,39
0,3	0,30
0,4	0,21
0,5	0,16
0,6	0,11
0,7	0,07
0,8	0,04
0,9	0,01

Из таблиц видно, что при отсутствии мелиоративного воздействия продуктивность плодовых культур невысока, о чем свидетельствуют низкие значения вероятностей превышения в области высоких уровней продуктивности при совместном учете водного и теплового режима.

Таким образом, влагообеспеченность чернозема выщелоченного плодового сада не позволяет получать полноценные урожаи фруктов в условиях Алтайского Приобья. Так в 0,63 лет и 0,28 лет из 10 яблоневые и грушевые насаждения соответственно испытывают дефицит влагозапасов. Наиболее вероятные значения температур почвы на глубине 20 см являются оптимальными для роста и развития яблоневых и грушевых культур. На глубине 50 см наиболее вероятные температуры почвы несколько ниже оптимальных значений, а так как основная доля корней плодовых культур расположена в слое 20-60 см, то для обеспечения высоких урожаев фруктов необходимо предусмотреть подогрев поливной воды, например в прудах-накопителях.

#### **4.2. Регулирование водного режима почвы**

Рассмотренные особенности влагопереноса в почвах плодовых садов позволяют сделать вывод о необходимости регулирования водного режима.

Основным источником почвенной влаги являются атмосферные осадки. Не менее значительную роль играют также близко расположенные грунтовые воды (не глубже 3-4 м), капиллярным подтоком которых увлажняется почва. Однако для изучаемой территории эта статья прихода влаги недоступна. Как правило, в районах орошаемого земледелия запасы почвенной влаги пополняются поливами, а орошение является главным элементом эффективного регулирования факторов жизни растений (Константинов и др., 1979).

«В настоящее время понимание водного режима включает следующие условия:

- Условия на верхней границе – все процессы влагообмена, происходящие на поверхности почвы: испарение, выпадение осадков, поливы, а также транспирация растений, хотя этот процесс происходит в пределах корнеобитаемой толщи;
- Условия на нижней границе – процессы оттока и притока влаги, происходящие на нижней границе почвенной толщи (свободный гравитационный отток влаги), отсутствие потока – водоупор на нижней границе, заданный поток влаги;
- Начальные условия – распределение влажности почвы или давления влаги почвы в момент, с которого начинается рассмотрение водного режима за конкретный период исследования;
- Гидрофизические свойства почвы, определяющие перераспределение поступившей на верхнюю границу почвы влаги внутри почвенной толщи, а также возможность формирования верховодки, потоков инфлюкционного или инфильтрационного типа и все процессы перераспределения воды внутри почвенного профиля» (Шеин, 2005).

Возможность регулирования водного режима почв под плодовыми культурами рассмотрим на примере яблони, т.к. она является доминирующей плодовой культурой в условиях Сибири. Водопотребление сельскохозяйственных культур – расход воды на определённой площади за

период вегетации растений, [ $m^3/га$ , мм]. Водопотребление определяется расходом воды на транспирацию растений и испарением с поверхности почвы. Оно изменяется в зависимости от абиотических условий, вида растений, уровня агротехники. Сочетание оросительных мелиораций с высокой агротехникой и применением удобрений даёт максимальное повышение урожайности сельскохозяйственных культур при уменьшении коэффициента водопотребления.

Момент начала расчета водного режима соответствовал окончанию весеннего снеготаяния. При моделировании поливов начало расчета планировалось на первую декаду мая, конец расчета на третью декаду августа.

Величина водопотребления рассчитана методом водного баланса (Костяков, 1960):

$$E_i = M_i + P_i + (W_{ni} - W_{ki}) \pm q_i \quad (6)$$

где  $M_i$  – оросительная норма за расчетный период,  $m^3/га$ ;  $P_i$  – осадки за расчетный период,  $m^3/га$ ;  $W_{ni}$  – запас почвенной влаги на момент начала вегетации,  $m^3/га$ ;  $W_{ki}$  – запас почвенной влаги на момент конца вегетации,  $m^3/га$ ;  $q_i$  – влагообмен на нижней границе расчетного слоя почвы,  $m^3/га$ , равный 0, т.к. грунтовые воды залегают на глубине, исключаящей капиллярную связь с ними.

Результаты расчета водного режима почвы приведены на рис. 20-22.

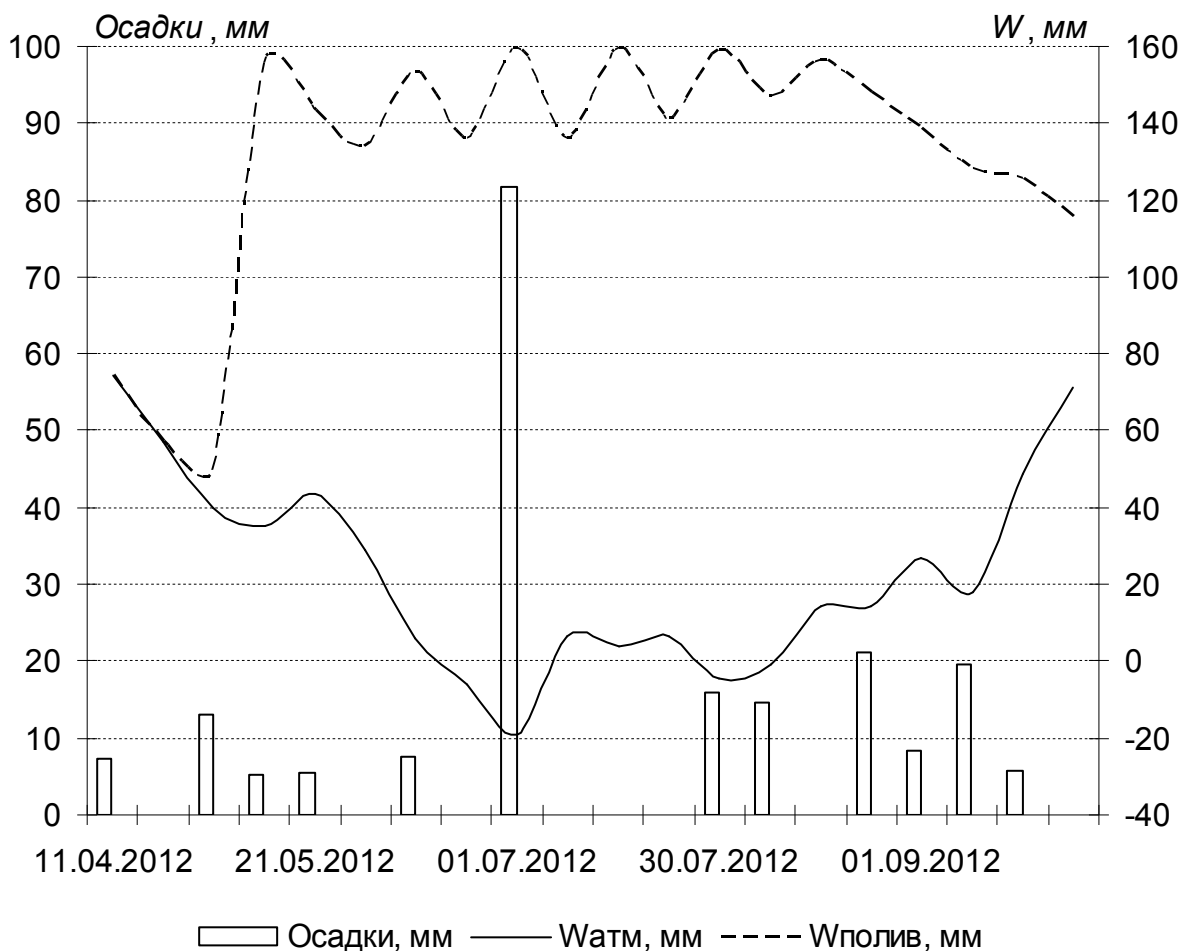


Рис. 20. Водный режим почвы под яблоневыми насаждениями за вегетационный период 2012г. Осадки – сумма эффективных осадков за декаду; Wатм – подекадный продуктивный запас влаги при атмосферном увлажнении; Wполив – подекадный продуктивный запас влаги при поливе (модельный эксперимент).

Как видно из рисунка, величина дефицита влаги на начало вегетации яблони (первая декада мая) в 2012 г составила около  $1200 \text{ м}^3/\text{га}$ . Для восполнения этого дефицита был произведен модельный полив нормой  $1200 \text{ м}^3/\text{га}$ , который можно рассматривать как влагозарядковый. Следует отметить, что при регулярном вегетационном орошении плодовых культур потребность во влагозарядковых поливах снижается. В острозасушливый вегетационный период 2012г с высокими температурами, сопровождающимися суховеями суммарное водопотребление составило  $2300 \text{ м}^3/\text{га}$ . Июльские ливневые дожди лишь частично восполнили дефицит почвенной влаги. Почва быстро

иссушалась, увеличивая при этом испарение. В междурядьях поверхность почвы в июле в отдельные дни прогревалась до  $+40^{\circ}\text{C}$ . В итоге половину июля, в метровом слое почвы под яблоневыми насаждениями, наблюдался дефицит продуктивных влагозапасов, при этом значения влажности почвы были ниже влажности завядания растений.

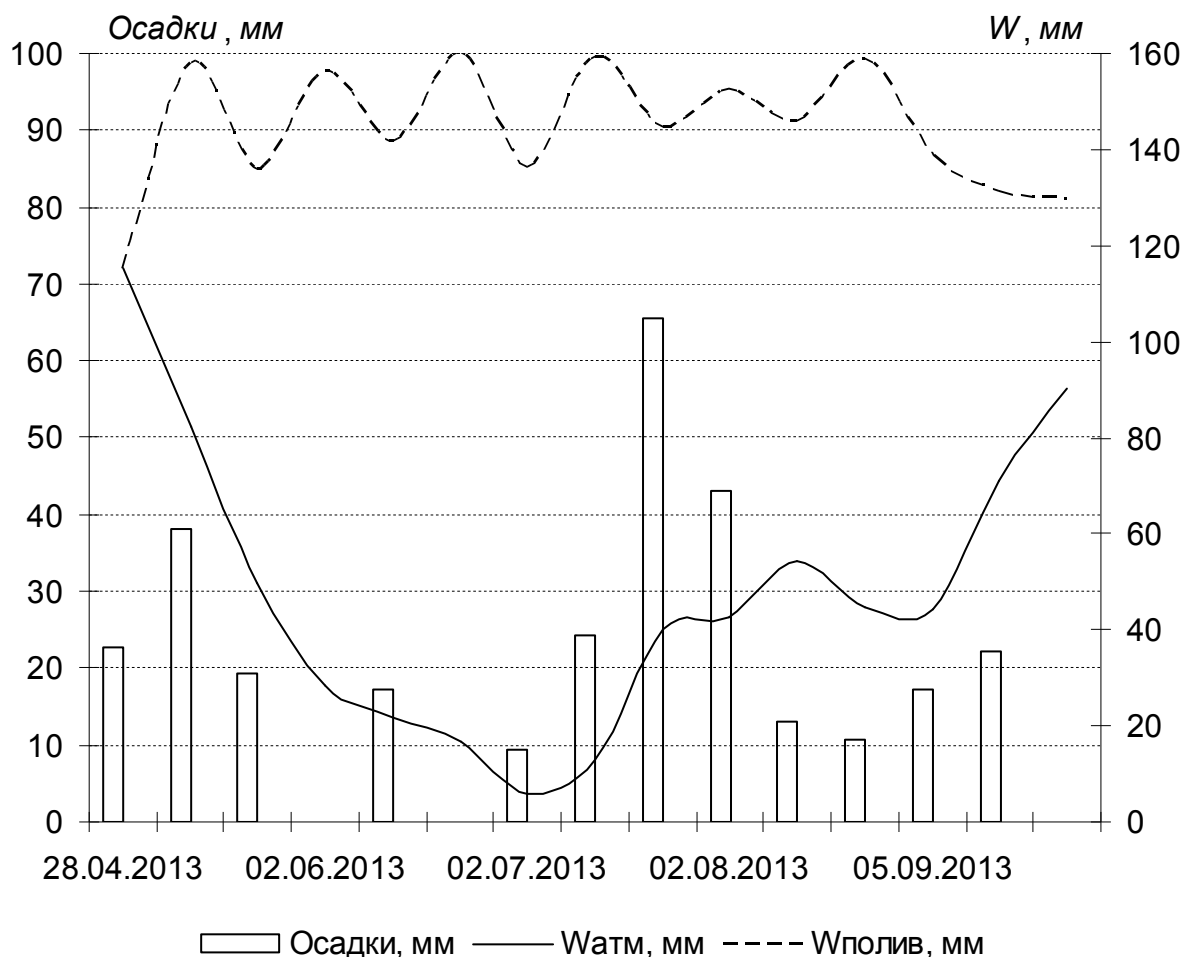


Рис. 21. Водный режим почвы под яблоневыми насаждениями за вегетационный период 2013г. Осадки – сумма эффективных осадков за декаду;  $W_{атм}$  – подекадный продуктивный запас влаги при атмосферном увлажнении;  $W_{полив}$  – подекадный продуктивный запас влаги при поливе (модельный эксперимент).

В 2013 году полевые измерения влажности нами были начаты только 28 апреля, т.к. в предшествующий осенне-зимний период 2012-13гг выпало аномальное количество атмосферных осадков, что способствовало замедлению процесса снеготаяния. В связи с этим на момент начала

возобновления вегетации плодовых культур величина продуктивных запасов влаги в почве составляла 70 мм, что больше, чем в прошлом году, но все же недостаточна для оптимального увлажнения плодовых культур. При этом дефицит почвенной влаги составил около 480 м<sup>3</sup>/га, что в 2,5 раза меньше чем в 2012г. За вегетационный период 2013г суммарное водопотребление и оросительная норма при модельном поливе составили 6047 м<sup>3</sup>/га и 2876 м<sup>3</sup>/га соответственно, что меньше этих величин в 2012г.

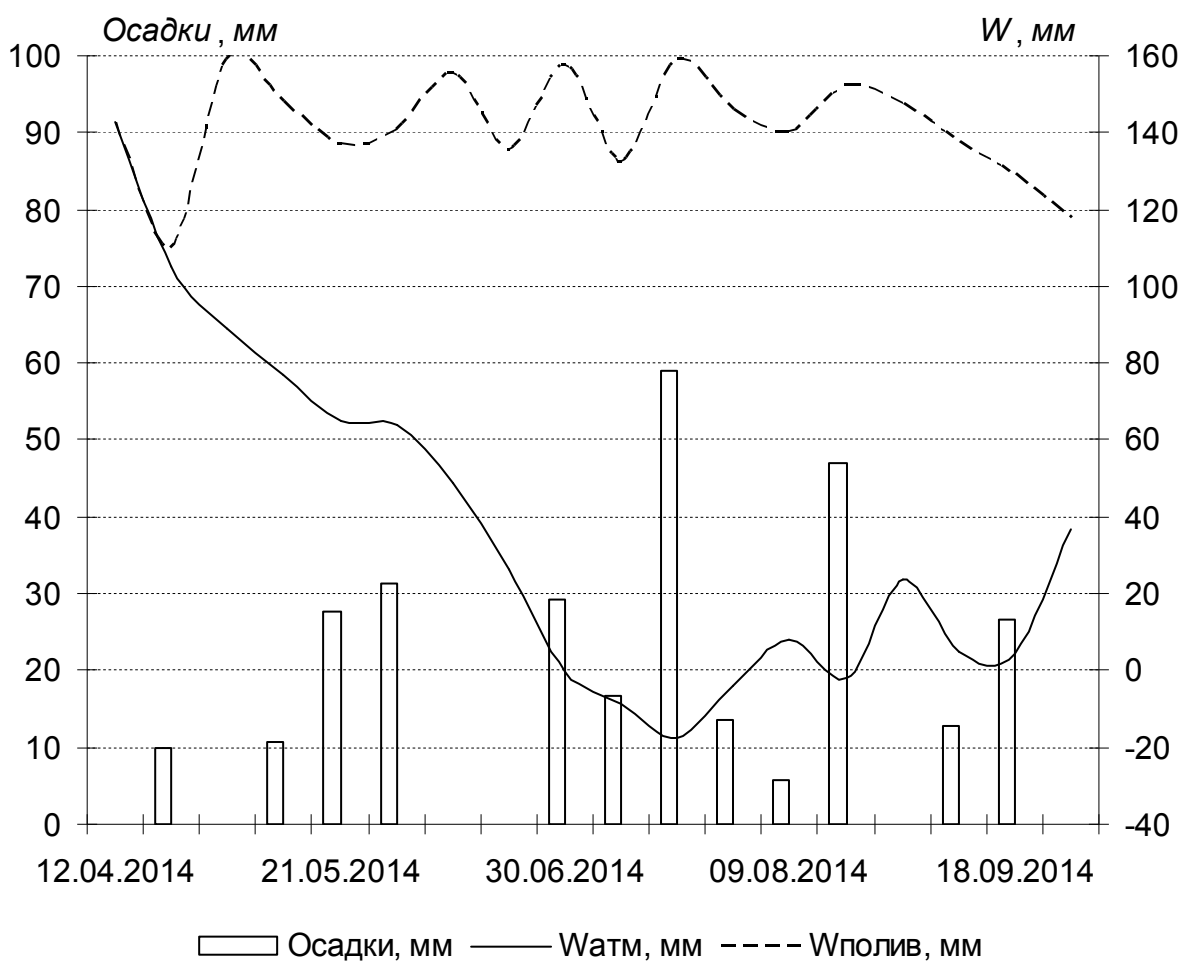


Рис. 22. Водный режим почвы под яблоневыми насаждениями за вегетационный период 2014г. Осадки – сумма эффективных осадков за декаду; W<sub>атм</sub> – подекадный продуктивный запас влаги при атмосферном увлажнении; W<sub>полив</sub> – подекадный продуктивный запас влаги при поливе (модельный эксперимент).

Предыдущий благоприятный 2013 гидрологический год обусловил высокие значения весенних продуктивных почвенных влагозапасов в 2014г

(рис.22). Но, в связи с высокими весенними температурами величина дефицита влаги на момент возобновления вегетации составила  $740 \text{ м}^3/\text{га}$ . Практически весь июль, несмотря на выпавшие осадки, средняя влажность в метровом слое почвы была ниже величины влаги завядания.

В целом, анализируя полученные данные в ходе исследований можно отметить, что водный режим яблоневого сада в различные по климатическим условиям годы исследований складывался по-разному. Поэтому в течение вегетационного периода для конкретной определенной фазы развития яблоневого сада нельзя рекомендовать определенное число поливов. В основном это зависит от применяемого способа орошения и гидротехнических условий года. Модельные расчеты показали, что в среднем за вегетационный период в условиях Алтайского Приобья необходимо проводить 12-17 поливов яблоневых культур через 5-9 дней нормой  $200 \text{ м}^3/\text{га}$ .

Результаты расчета элементов водного баланса яблоневого сада по годам исследований представлены в таблице 7.



Таблица 7

Водный баланс яблоневого сада по годам исследований,  $\text{м}^3/\text{га}$ 

Элементы водного баланса за вегетационный период	Годы	Без полива	Полив (модельный эксперимент)
Оросительная норма, $\text{м}^3/\text{га}$	2012	–	4628
	2013	–	2876
	2014	–	3338
	среднее, $\text{м}^3/\text{га}$	–	3614
	$\sigma$ , $\text{м}^3/\text{га}$	–	908
	$V$ , %	–	25
Осадки, $\text{м}^3/\text{га}$	2012	2057	2057
	2013	3029	3029
	2014	2908	2908
	среднее, $\text{м}^3/\text{га}$	2665	2665
	$\sigma$ , $\text{м}^3/\text{га}$	53	53
	$V$ , %	20	20
Почвенная влага, $\text{м}^3/\text{га}$	2012	138	581
	2013	-248	142
	2014	-1063	129
	среднее, $\text{м}^3/\text{га}$	-391	284
	$\sigma$ , $\text{м}^3/\text{га}$	613	257
	$V$ , %	157	91
Суммарное водопотребление, $\text{м}^3/\text{га}$	2012	2195	7266
	2013	2781	6047
	2014	1845	6375
	среднее, $\text{м}^3/\text{га}$	2274	6563
	$\sigma$ , $\text{м}^3/\text{га}$	473	631
	$V$ , %	21	10

Суммарное водопотребление яблоневых насаждений при проведении оросительных мелиораций возрастает в 3 раза, увеличиваясь с  $2274 \text{ м}^3/\text{га}$  до  $6563 \text{ м}^3/\text{га}$ . При этом коэффициент вариации как мера рассеивания одного и того же признака в нескольких совокупностях с различным средним арифметическим уменьшается в 2 раза. Из этого можно сделать практический вывод о положительном влиянии орошения на вариабельность водного режима, что, в конечном счете, благотворно действует на развитие растения, снижая вероятность возникновения водного стресса у него.

Величина дефицита влаги на момент начала возобновления вегетации яблоневых культур в условиях Алтайского Приобья (первая декада мая) за годы исследований составила  $500\text{-}1200 \text{ м}^3/\text{га}$ . Учитывая это, рекомендуется проводить осенние влагозарядковые поливы, что также создает благоприятные условия для подготовки плодовых деревьев к зиме. При этом необходимо оставлять некоторый резерв для почвенной аккумуляции осенне-зимних осадков. Весеннюю влагозарядку по сравнению с осенней осуществляют большими нормами воды, с целью увлажнения всего корнеобитаемого слоя на глубину до  $1,2\text{-}1,5 \text{ м}$ . При регулярном вегетационном орошении плодовых культур эффективность влагозарядковых поливов снижается.

#### **4.3. Биоклиматические коэффициенты яблоневых культур в условиях Алтайского Приобья.**

Одной из характерных особенностей получения высоких и устойчивых урожаев плодовых культур являются высокие оросительные нормы, которые в острозасушливые годы достигают  $3000\text{-}5000 \text{ м}^3/\text{га}$ , что обуславливает необходимость проведения  $12\text{-}17$  вегетационных поливов. При этом проблемой орошаемого земледелия является разработка оперативных способов и средств корректировки поливных режимов плодовых культур, в частности, яблони.

При отсутствии инструментального контроля предполивного порога применяют эмпирические методы расчета водопотребления по метеопараметрам в виде различных коэффициентов. Наибольшей простотой и точностью расчетов выделяется метод А.М. Алпатьева (1965, 1967), основанный на использовании дефицита упругости водяного пара и так называемых биологических коэффициентов, которые характерны для каждой территории, их необходимо уточнять для местных агроклиматических условий (Шейн, Гончаров, 2006; Кулыгин, 2013).

Однако в условиях Алтайского Приобья эти коэффициенты для плодовых культур до настоящего времени не были получены. Нами получены биоклиматические коэффициенты плодовых культур по результатам модельного эксперимента и проведенных в течение трех лет полевого эксперимента в НИИСС им. М. А. Лисавенко (Табл. 8).

В данном методе потребность растений в воде измеряется в виде суммарного испарения растительного покрова. Эту величину можно сравнить с фактическим испарением, а чаще сравнивают с испаряемостью. Метода основан на положении о том, что сомкнутый растительный покров при оптимальном водоснабжении испаряет столько же, сколько испаряется с поверхности воды. Биологический коэффициент представляет собой суммарное потребление влаги растительным покровом, приведенное к испаряемости при нормальных (усредненных) метеоусловиях. В результате, надо только уметь рассчитывать суммарное испарение растительного покрова. В расчетах учитывалось суммарное испарение в слое 0-100 см несмотря на то, что водопотребление поля, занятого плодовой культурой, расходуется на транспирацию и испарение почвы. На испарение с поверхности почвы действуют только факторы внешней среды, а транспирация обуславливается взаимным влиянием внешних и внутренних факторов растений. Определить доли транспирации и испарения почвы в водопотреблении сложно, поэтому их обычно определяют как единое целое.

Расчет биоклиматических коэффициентов проводился на основании учета суммарного водопотребления ( $E$ , мм) яблони и груши, проводимого воднобалансовым методом по декадам вегетационного периода и дефициту влажности воздуха ( $d$ , мм) в эти же декады (Алпатьев, 1965, 1967):

$$K_d = \sum E / \sum d \quad (7)$$

где  $K_d$  – биоклиматические коэффициенты, вычисленные по сумме среднесуточных дефицитов влажности воздуха.

Результаты расчета показаны в таблице 8.

Биологические коэффициенты - это переменные величины, зависящие как от почвенно-климатических условий, так и от самих растений. Более того, эти коэффициенты меняются в течение вегетационного сезона, что приводит к динамическим кривым потребления воды, или так называемым биологическим кривым. Биологические кривые – это динамика испарения влаги растительным покровом при оптимальной обеспеченности растений водой. Они отражают изменение потребности растения во влаге в течение вегетационного сезона в условиях их выращивания. Поэтому биологические кривые специфичны не только для каждого вида растений, но зависят от природно-климатической зоны и условий минерального питания (Шеин, Гончаров, 2006).

Биоклиматические коэффициенты плодовых культур в условиях Алтайского Приобья

Месяц	Декада	$K_6$	$\sigma$
Май	I	1,12	0,87
	II	0,66	0,08
	III	0,74	0,50
Июнь	I	0,42	0,18
	II	0,29	0,10
	III	0,45	0,17
Июль	I	1,25	0,72
	II	0,30	0,06
	III	0,38	0,14
Август	I	1,16	0,43
	II	0,72	0,19
	III	0,51	0,28

Из таблицы видно, что значения коэффициентов максимальны в весенний период на момент возобновления вегетации и в первую декаду июля, когда водопотребление плодовыми культурами максимально. Суммарное испарение, рассчитанное по дефициту влажности воздуха, определяется по данным ближайшей метеостанции. Несмотря на то, что метеостанции, расположены, как правило, на богаре нами не была учтена так называемая микроклиматическая поправка, т.к. в качестве основного вида оросительной мелиорации плодового сада предполагается использовать капельное орошение, для которого характерно минимальное испарение с поверхности почвы. Данные биоклиматические коэффициенты можно применять при расчете поливных норм плодовых культур в условиях Алтайского Приобья при отсутствии инструментального контроля предполивного порога влажности почвы.

## **ГЛАВА V. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

### **5.1. Требования растений к факторам внешней среды**

#### **5.1.1. Общие сведения о факторах внешней среды**

Рост и развитие растений протекает во взаимосвязи с внешней средой, и подчиняются определенным биологическим законам. «Наиболее важные из них следующие:

- закон минимума, согласно которому продуктивность ограничивается фактором, находящимся в минимуме;

- закон оптимума, согласно которому каждый фактор имеет свой оптимум, понижение или повышение величины фактора по сравнению с оптимумом вызывает ослабление развития растения;

- оптимальные значения факторов претерпевают изменения в процессе жизни растений (Воробьев, 1964; Голованов и др., 1986)».

Растение для нормального роста и развития необходимо обеспечить всеми факторами в необходимых соотношениях и количествах, что определяется законом незаменимости факторов внешней среды. Это условие выполнимо благодаря способности почвы аккумулировать необходимые вещества, и расходовать их растением в некоторых интервалах по мере необходимости. В этом проявляется способность системы почва - растение к саморегулированию, что необходимо использовать при искусственном регулировании внешних условий.

В мелиорации также важен закон минимума, который можно сформулировать следующим образом: «развитие растения ограничивается тем фактором, который находится в наименьших, относительно оптимальных количествах. Данный закон указывает, какой фактор необходимо регулировать в данный момент времени для создания оптимальных условий (Голованов, 1986)».

Особое значение для мелиорации имеет закон оптимума, который можно описать так: «каждый фактор имеет оптимум, т.е. повышение или понижение величины фактора вызывает ослабление жизненных процессов, а при некотором удалении от оптимальной зоны значение фактора становится губительным для растения (Голованов, 1986)». Формулировка данного закона предполагает, что его можно представить в виде кривых, имеющих максимум в диапазоне оптимальных условий.

Из вышесказанного следует, что продуктивность зависит от большого количества факторов внешней среды, из них влияющие на рост и развитие растения, являются свет, температура, воздух, вода, питательные элементы.

В отличие от динамики почвенных свойств природно-климатические условия обладают значительно большей динамикой, при этом основными природными факторами, влияющими на рост и развитие растений, являются гидротермические условия, которые подвержены сильным изменениям не только в течение года, но и внутри суток (Плюснин, Голованов, 1983).

Относительная продуктивность для  $i$ -того момента времени является функцией, зависящей от основных жизненно важных факторов (Шабанов, 1973, 1992; Шабанов, Орлов, 2003):

$$S_{\text{общ}} = f(S_t; S_w; S_p) \quad (8)$$

где: « $S_{\text{общ}}$  - относительная продуктивность в  $i$ -тый момент времени с учетом гидротермического и пищевого режимов;  $S_t$  - относительная продуктивность в  $i$ -тый момент времени в зависимости от температурного режима, при оптимальном значении водного и пищевого режимов;  $S_w$  - относительная продуктивность в  $i$ -тый момент времени в зависимости от водного режима, при оптимальном значении теплового и пищевого режимов;  $S_p$  - относительная продуктивность в  $i$ -тый момент времени в зависимости от пищевого режима, при оптимальном значении водного и теплового режимов».

### 5.1.2. Требования растений к водному режиму почв.

Как уже было отмечено выше, вода занимает исключительно важную роль в росте и развитии растений на протяжении всей их жизни. Рассмотрим кривую зависимости продуктивности плодовых культур в условиях Алтайского Приобья от запасов продуктивной влаги в почве. Основой для построения данной зависимости является функция нормального распределения параметров при тождестве матожидания и оптимальных продуктивных влагозапасов, а также среднеквадратичного отклонения и коэффициента саморегулирования растения.

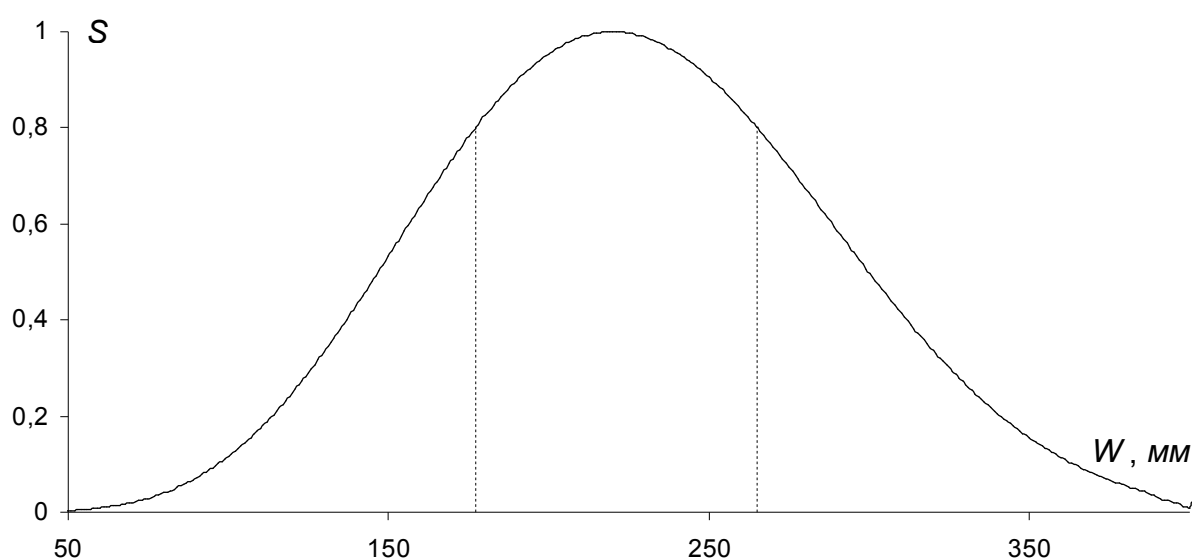


Рис.23. Зависимость продуктивности плодовых культур от запасов продуктивной влаги в черноземе выщелоченном Алтайского Приобья. Исходные данные для нормального закона распределения:  $W_{opt}$  и  $\gamma$ .

На рисунке показаны зоны практического регулирования продуктивных влагозапасов (вертикальные штриховые линии) с целью поддержания относительной продуктивности плодовых культур в диапазоне 0,8-1.

Также рассмотрим распределение вероятностей продуктивных влагозапасов в слое 0-100 см чернозема выщелоченного под плодовыми культурами в условиях Алтайского Приобья.



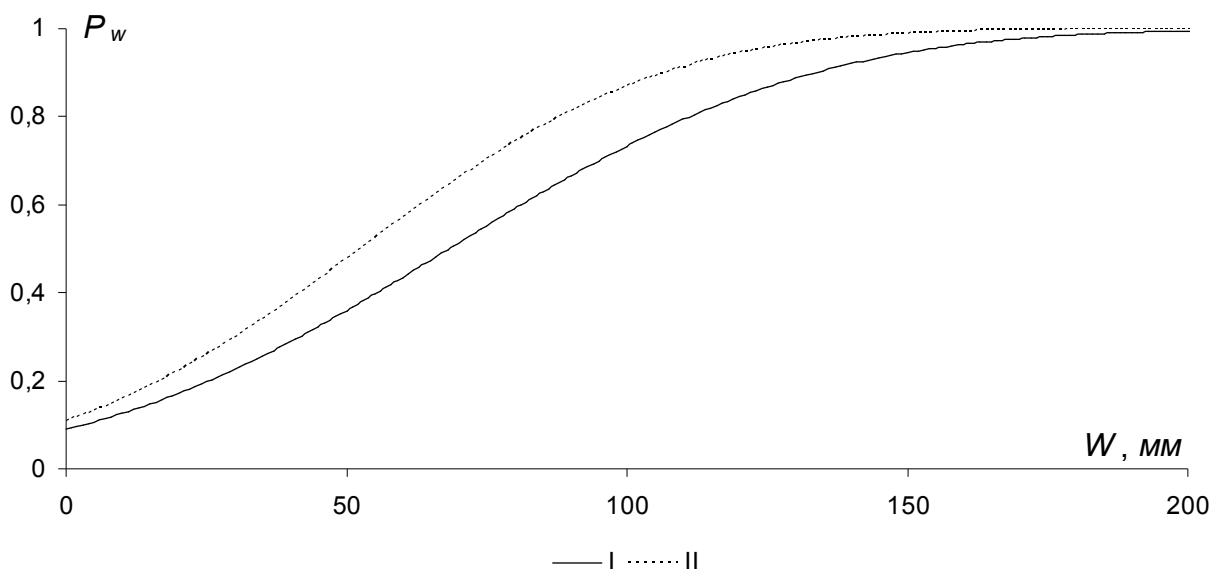


Рис. 24. Интегральная функция распределения вероятностей продуктивных влагозапасов в слое 0-100 см чернозема выщелоченного под плодовыми культурами: I — яблоня, II — груша. Исходные данные для нормального закона распределения: среднемноголетнее значение продуктивных влагозапасов ( $W$ ) под плодовыми культурами и соответствующее ему  $\sigma_w$ .

Из рисунка видно, что под яблоневыми насаждениями формировался более напряженный многолетний водный режим и значения вероятностей тех или иных значений продуктивных запасов влаги под яблонями имели меньшие значения, чем под грушами.

### 5.1.3. Требования растений к тепловому режиму почв.

Температура имеет огромное значение для роста и развития растений. От неё зависят такие важные функции растений, как фотосинтез, дыхание, транспирация.

Изучению температурного режима и тепловых свойств почв посвящены работы А.Ф. Чудновского (1947-1976); А.М. Шульгина (1948, 1957, 1972), И.И. Плюснина (1960), И.Б. Ревута (1960, 1972), С.Ф. Алексеевой (1971), Г.Н. Мартыяновой (1971), В.Н. Димо (1972, 1978), В.П. Панфилова (1975, 1976, 1977, 1981), В.Г. Чигира (1975), С.В. Макарычева

(1980, 1981, 1993, 1996, 2000, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2013), Т.А. Архангельской (2003, 2004, 2008, 2012), Микайылова, Шеина, 2010. За рубежом этим вопросам посвящены работы (Keen, 1931; Kersten, 1948, 1949; Sepaskhan, Boersma, 1957; Weber and Caldwell, 1964; Wierenga et al., 1969; Parikh et al., 1979; Hanks and Ashcroft, 1980; Grundmann et al., 1995; Scanlon and More, 2000; Nielson et al., 2001).

Прорастание семян возможно, только при определенной температуре. В целом, растение является термодинамической системой (Глобус, 1984; Голованов и др., 1986), при этом температура растения зависит от теплообмена с окружающей средой и от биохимических процессов, происходящих в нем, причем у отдельных его частей температура неодинакова. При низких температурах происходит замедление роста растения, а при нулевой температуре видимые проявления жизни растений приостанавливаются либо очень сильно замедляются. В то время как с повышением температуры жизненные процессы активизируются, и при её переходе через оптимальное значение в растении начинает преобладать распад неустойчивых соединений, и развитие растения также замедляется. При дальнейшем увеличении температуры до предельного значения происходит нарушение метаболизма и растение погибает.

При характеристике требований растений к температурному режиму применяют кардинальные точки, которые отмечают экстремальные значения температур: минимальной ( $t_{min}$ ), максимальной ( $t_{max}$ ) и оптимальной ( $t_{opt}$ ), наиболее благоприятной для развития растений. При экстремальных температурах все процессы, протекающие в растении, замедляются настолько, что при дальнейшем изменении температуры они полностью прекращаются. «Следует отметить, что прекращение роста растения еще не влечет за собой его гибели, летальные точки для жизни растений расположены несколько ниже значений  $t_{min}$  и  $t_{max}$  (Клюева, 1982)». Рассмотрим кардинальные точки для различных уровней продуктивности (рис.25)

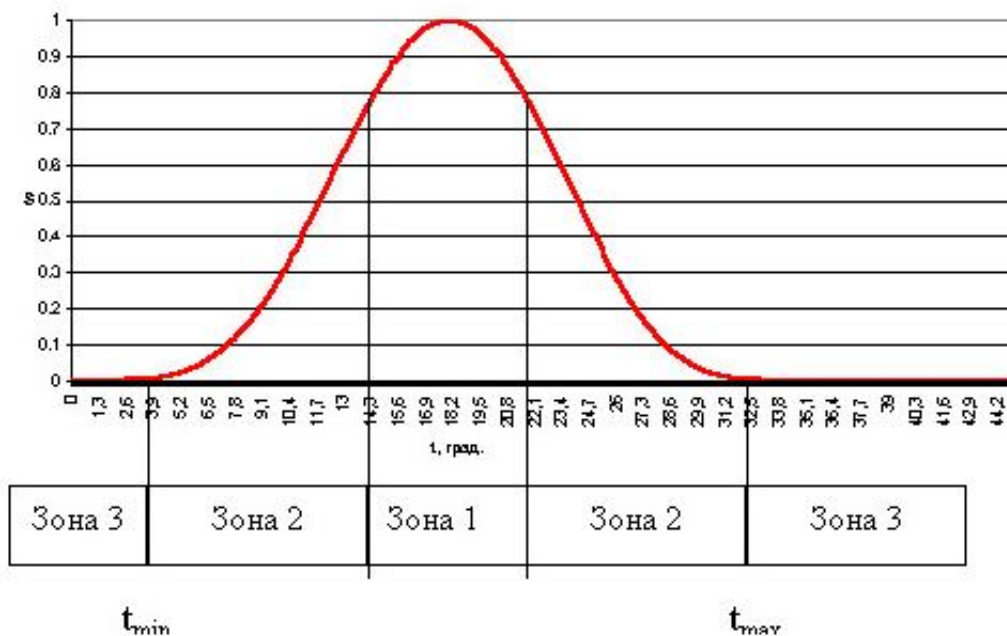


Рис. 25. Зависимость продуктивности растения от продуктивных температур почвы (цит. по В.В. Шабанову и И.С. Орлову, 2003)

Отмеченные на рисунке зоны: 1 - зона активной вегетации, при этом максимально реализуется потенциал растений и достигается максимально возможная продуктивность; 2 - зоны адаптации растения к воздействию экстремальных температур. При этом растения не повреждаются, а приобретают устойчивость к этим температурам. Признаки адаптации исчезают при возвращении в зону активных температур; 3 - зоны повреждения растения в результате воздействия экстремальных температур. В данных температурных зонах происходит разрушение структуры отдельных клеток, тканей и органов растений.

Построим кривую зависимости продуктивности яблони и груши от температуры почвы.

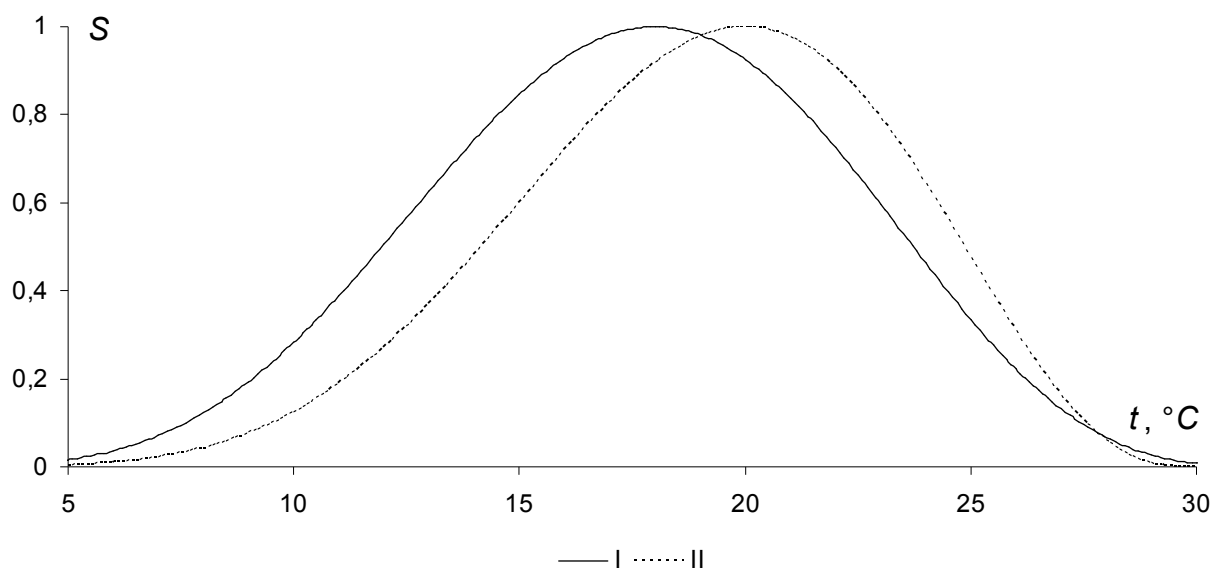


Рис. 26. Зависимость продуктивности яблони (I) и груши (II) от температуры почвы. Чернозем выщелоченный Алтайского Приобья.

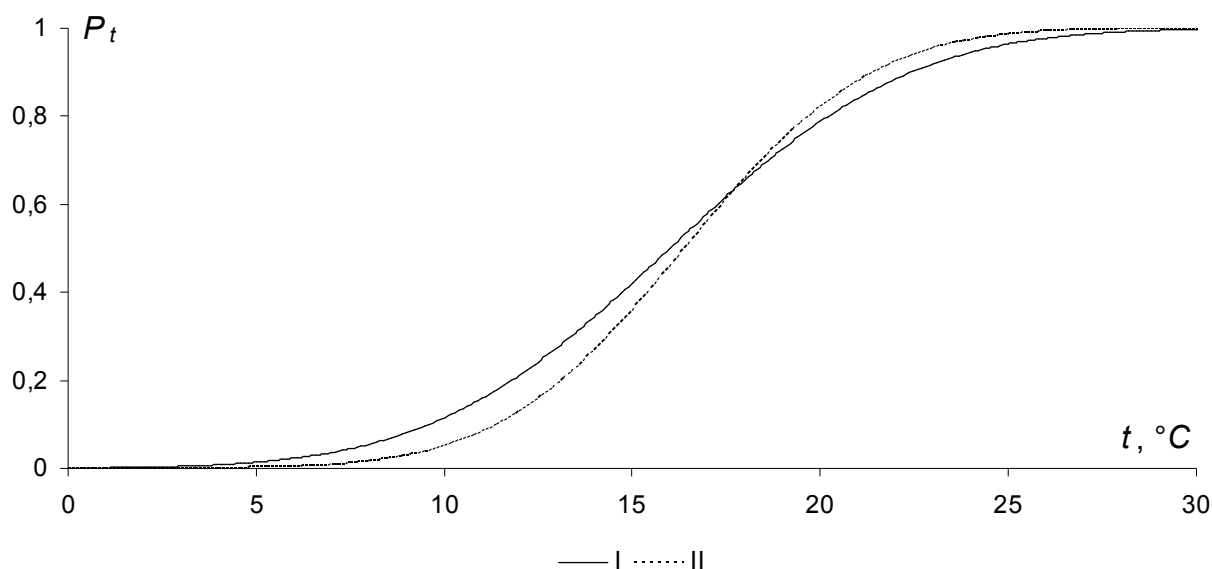


Рис. 27. Интегральная функция распределения вероятностей продуктивных температур в слое 0-100 см чернозема выщелоченного под плодовыми культурами: I – яблоня, II – груша.

#### 5.1.4. Требования растений к пищевому режиму почв

Одним из самых важных факторов жизни растений являются питательные вещества, которые не могут быть заменены другими факторами внешней среды, при этом нельзя заменить один питательный элемент другим. Максимальная продуктивность растений достигается при достаточном

количестве в почве элементов питания, находящихся в доступной для растений форме.

Нами пищевой режим учитывался путем задания поправочных коэффициентов на содержание гумуса в пахотном слое, мощность гумусового горизонта, негативные свойства почв. Относительная продуктивность в  $i$ -тый момент времени в зависимости от пищевого режима, при оптимальном значении водного и теплового режимов (Шабанов, Орлов, 2003):

$$S_p = K_1 K_2 K_3 \quad (9)$$

где  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  – соответственно поправочные коэффициенты на: содержание гумуса в пахотном слое, мощность гумусового горизонта, негативные свойства почв: засоление, солонцеватость, каменистость.

## **5.2. Продуктивность плодовых культур в зависимости от условий среды.**

### **5.2.1. Продуктивность плодовых культур при естественном водном и тепловом режиме**

В предыдущей главе были определены вероятности необходимости орошения, но делать окончательный вывод можно после анализа одновременного воздействия температурных и водных условий почвы. Так как в условиях с достаточно низкими температурами, даже, если вероятность необходимости орошения будет велика, эффекта от орошения не будет. Это определяется «Законом Либиха», согласно которому – продуктивность растений определяется лимитирующим фактором среды.

Зависимость продуктивности растения от факторов внешней среды может быть описана различными функциями. Нами использована модель В.В. Шабанова, которая записана в виде обыкновенного дифференциального уравнения, параметры которой являются функциями этапов развития растения.

Изменение относительной продуктивности  $S_i$  для  $i$ -го момента времени от условий внешней среды (Шабанов, Орлов, 2003):

$$\frac{aS_i}{a\varphi_j} = \frac{kS(\varphi - \varphi_{opt})}{(\varphi + a_1)(\varphi - a_2)} \quad (10)$$

где « $k$  – коэффициент,  $\varphi_{opt}$  – оптимальное значение  $j$ -го фактора в  $i$ -ый момент времени,  $\varphi_{min}$  и  $\varphi_{max}$  – соответственные функции от  $a_1$  и  $a_2$ ,  $S = U/U_{max}$ ,  $U$ ,  $U_{max}$  – текущая и максимальная урожайность. Решение этого уравнения для  $i$ -го момента времени жизни биологического объекта и для  $j$ -го фактора при  $\varphi_{min} = 0$  можно записать в виде»:

$$S = \left( \frac{\varphi}{\varphi_{opt}} \right)^{\gamma\varphi_{opt}} \left( \frac{\varphi_{max} - \varphi}{\varphi_{max} - \varphi_{opt}} \right)^{\gamma(\varphi_{max} - \varphi_{opt})} \quad (11)$$

« $S$  – относительная продуктивность,  $\varphi$  – текущее значение фактора,  $\varphi_{max}$  – максимальное значение фактора,  $\varphi_{opt}$  – оптимальное значение фактора,  $\gamma$  – коэффициент саморегулирования растения».

Расчет средней продуктивности при совместном учете гидротермических и пищевых условий производится по формуле:

$$S_{общ} = \sum_i S_{i(wt)} K_p p_{wt} \quad (12)$$

где « $S_{общ}$  – относительная продуктивность в  $i$ -тый момент времени с учетом температурного, водного и пищевого режимов;  $S_{i(wt)}$  – заданный диапазон продуктивности;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий снижение продуктивности за счет почвенных условий;  $p_{wt}$  – вероятность появления заданного уровня продуктивности при совместном учете водного и теплового режимов почв».

$$p_{wt} = p_w p_t \quad (13)$$

где « $p_w$  – вероятность появления заданного уровня продуктивности по водному режиму почв;  $p_t$  – вероятность появления заданного уровня продуктивности по тепловому режиму почв».

Для расчета дисперсии продуктивности используется формула:

$$D(s) = \sum_{i=1}^n (S_i - S_{\text{общ}})^2 p_{Si} \quad (14)$$

где « $D(s)$  – дисперсия относительной продуктивности;  $S_i$  – текущее значение относительной продуктивности;  $S_{\text{общ}}$  – математическое ожидание относительной продуктивности;  $p_{Si}$  – вероятность появления  $i$ -го значения относительной продуктивности».

Дисперсия случайной величины имеет размерность квадрата случайной величины. Для характеристики рассеивания удобнее использовать величину, равную корню из дисперсии и имеющую размерность случайности величины. Данная величина называется среднеквадратическим отклонением:

$$\sigma_s = \sqrt{D(s)} \quad (15)$$

Относительное значение  $\sigma_s$  равняется частному от деления абсолютной величины  $\sigma_s$  на математическое ожидание и называется коэффициентом вариации:

$$C_{v_s} = \sigma_s / S_{\text{общ}} \quad (16)$$

«Эти зависимости позволяют получить границы экологической ниши при разных уровнях  $S$ : в двухфакторном случае такая ниша может быть очерчена эллипсом, а в трехмерном – эллипсоидом. Например, при рассмотрении в качестве переменных водного ( $W$ ) и теплового ( $t$ ) факторов зависимость можно представить в виде колоколообразной фигуры (Шабанов, Орлов, 2003)». Данная фигура, построена на следующих осях: аппликата – относительная продуктивность; абсцисса – продуктивные влагозапасы в почве; ордината – температура почвы (рис.28).

Расчет проведен для всего периода вегетации плодовых культур, при использовании следующих исходных данных:

- среднемноголетние значения температуры почвы ( $t$ ) на глубине 20 см, (°C);
- среднеквадратические отклонения значений температуры почвы ( $\sigma_t$ ), (°C);

- среднемноголетние значения продуктивных влагозапасов ( $W$ ) в слое почвы 0-100 см, (мм);
- среднеквадратические отклонения значений продуктивных влагозапасов ( $\sigma_W$ ), (мм);
- водно-физические свойства почвы.

Значения  $t$ ,  $\sigma_t$ ,  $W$ ,  $\sigma_W$  для вегетационного периода рассчитаны на основе подекадных инструментальных и расчетных (с помощью *HYDRUS*) значений влажности и температуры почвы в условиях плодового сада Алтайского Приобья за 2004-2014гг.

Также в расчете использованы входные параметры, являющиеся лимитирующими и определяющими границы условий роста и развития плодовых культур:

$W_{min}$  – минимально допустимое для растения значение продуктивных запасов влаги в слое почвы 0-100 см (мм), равно 0;

$W_{max}$  – максимально допустимое для растения значение продуктивных влагозапасов в слое почвы 0-100 см (мм);

$t_{min}$  – минимально допустимое для растения значение температур почвы на глубине 20 см (°C);

$t_{max}$  – максимально допустимое для растения значение продуктивных температур почвы на глубине 20 см (°C);

$W_{opt}$  – оптимальное для растения значение продуктивных влагозапасов в слое почвы 0-100 см (мм);

$\gamma_W$  – коэффициент саморегулирования растения по водному фактору;

$t_{opt}$  – оптимальное для растения значение температур почвы на глубине 20 см (°C);

$\gamma_t$  – коэффициент саморегулирования растения по температурному фактору.

Рассмотрим зависимость средней продуктивности плодовых культур в условиях сада при изменении температуры и влажности чернозема



выщелоченного (рис.28-32). Результаты представлены в трехмерном виде, а также в изометрических плоскостях продуктивных влагозапасов и температуры.

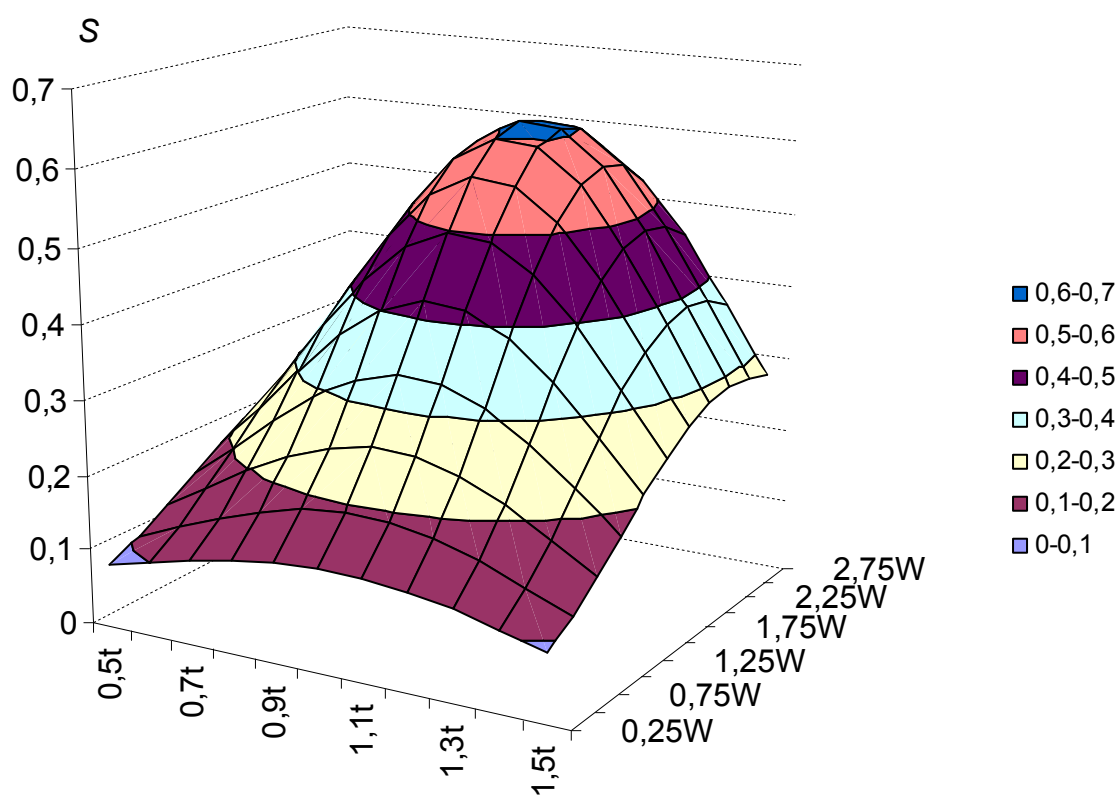


Рис. 28. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы.

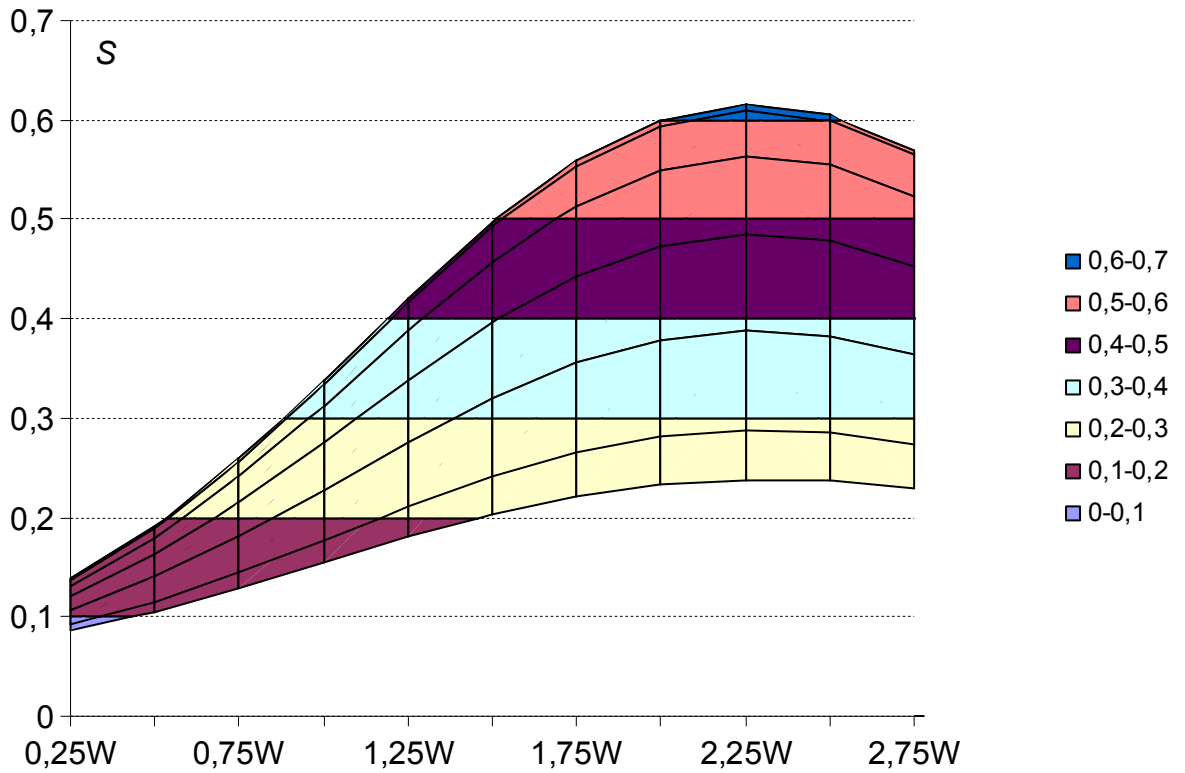


Рис. 29. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы. Плоскость продуктивных влагозапасов (изометрия).

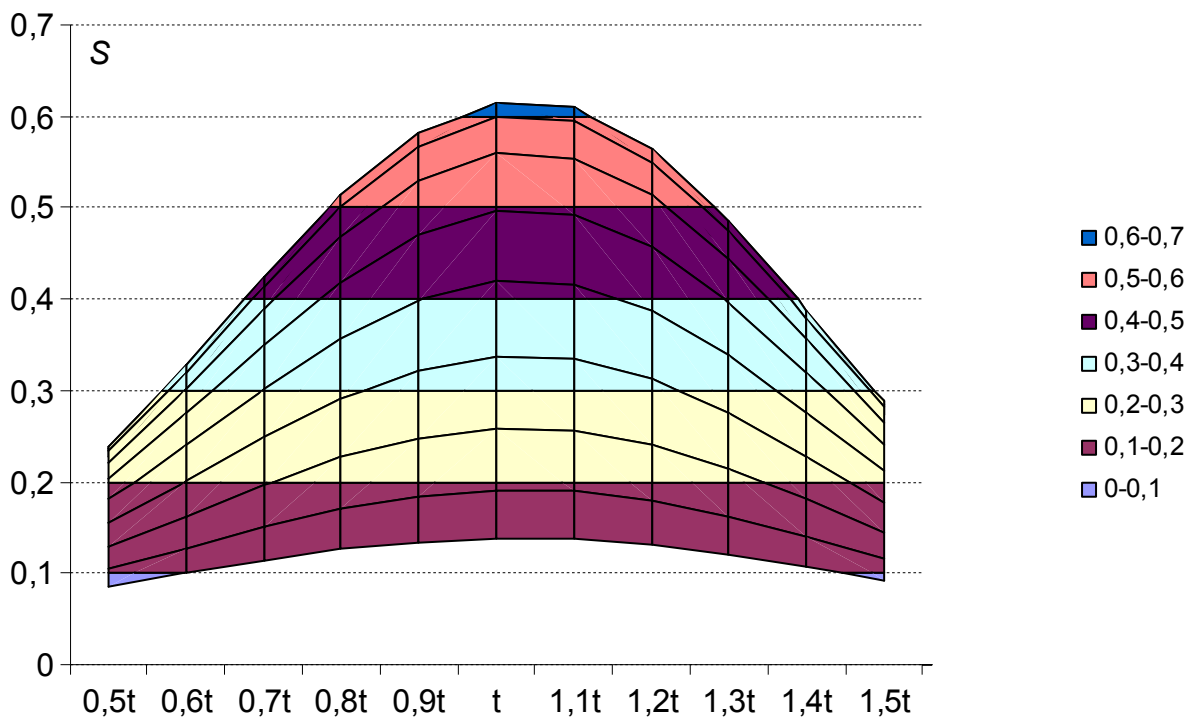


Рис. 30. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы. Плоскость температуры (изометрия).

Анализ рисунков показывает, что средняя за десятилетие продуктивность яблони в естественных условиях Алтайского Приобья составляет всего 20-30% от максимально возможной, при этом абсолютное значение урожайности равняется 25-60 ц/га, что соответствует реальным значениям, полученным за многие годы исследований академиком С.Н. Хабаровым (1991, 1999). Среднемноголетние температуры почвы для яблони следует признать оптимальными. Чувствительность к изменению внешних условий показывает достоинство использованного вычислительного инструмента.

При увеличении продуктивных запасов в черноземе в 2,25 раза продуктивность яблони увеличится до 60% от максимальной, что не совсем достаточно для полного использования яблоневых культур в условиях Алтайского Приобья.

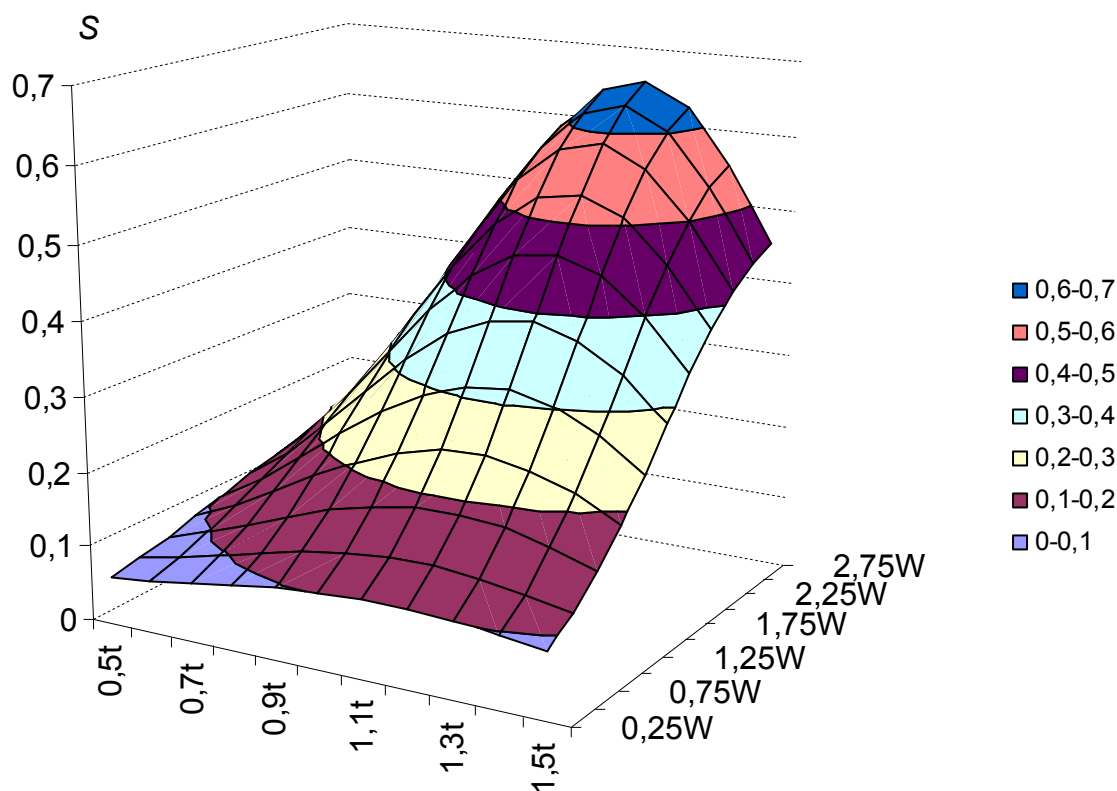


Рис. 31. Зависимость средней продуктивности груши при изменении температуры и влажности почвы.

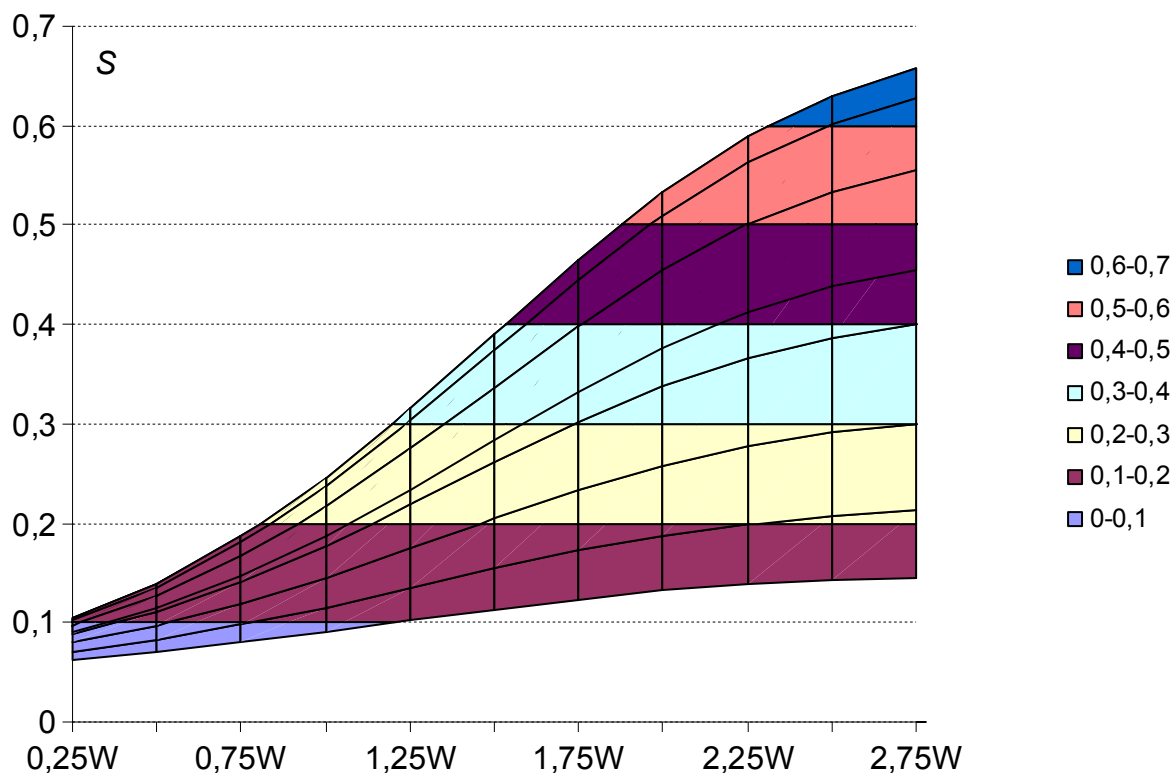


Рис. 32. Зависимость средней продуктивности груши при изменении температуры и влажности почвы. Плоскость продуктивных влагозапасов (изометрия).

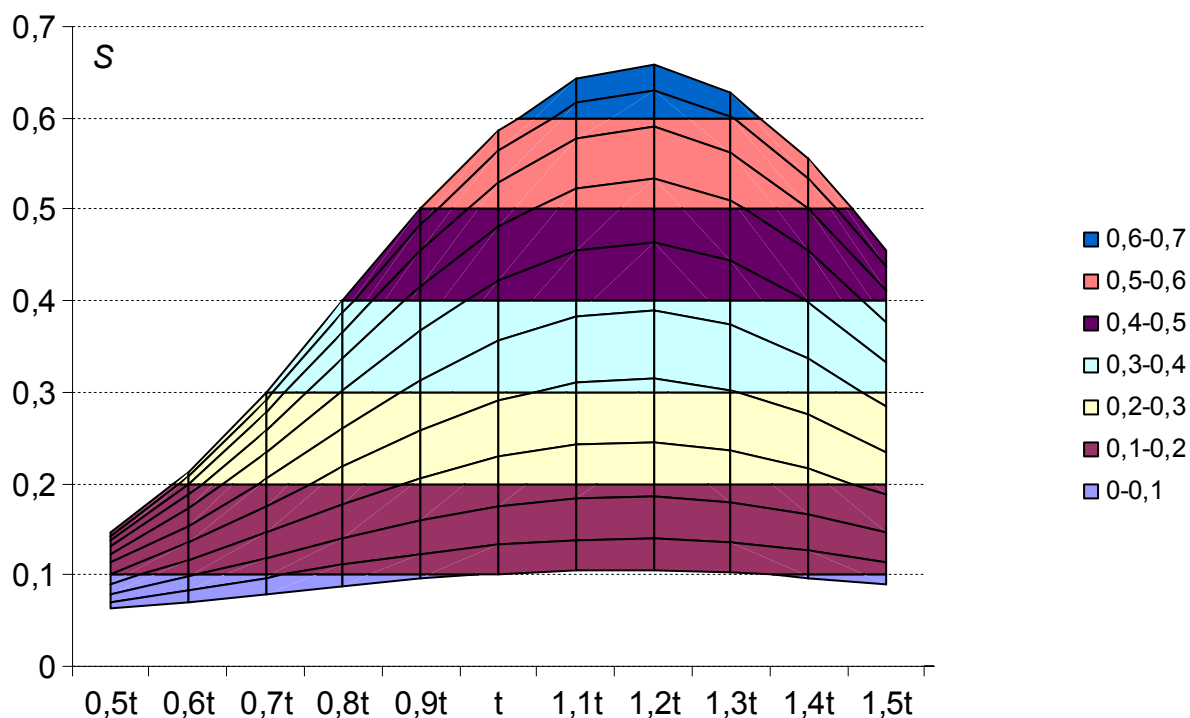


Рис. 33. Зависимость средней продуктивности груши при изменении температуры и влажности почвы. Плоскость температуры (изометрия).

Для груши средняя продуктивность в естественных условиях составляет всего 25% от максимально возможной. При увеличении продуктивных запасов в почве в 2,75 раза и температуры почвы в 1,2 раза продуктивность груши увеличится до 65% от максимальной, при этом также использован не весь потенциал возможной продуктивности. Из рисунков также видно, что диапазон регулирования гидротермического режима под плодовыми культурами достаточно высок. Поэтому нами был продолжен поиск путей возможного увеличения продуктивности данных культур. Была предложена рабочая гипотеза, заключающаяся в том, что на величину продуктивности влияют не только средние значения параметров, но и их среднеквадратические отклонения от среднего, что связано с дополнительными энергозатратами растения на поддержания своей жизнедеятельности в неустойчивых условиях внешней среды. Для этого были проведены дополнительное вычислительное моделирование

продуктивности плодовых культур при изменении среднеквадратических отклонений продуктивных влагозапасов и температур почвы.

### **5.2.2. Продуктивность плодовых культур при мелиоративном воздействии с управляемым водным и тепловым режимом**

Регулирование влажности почвы искусственным способом подразумевает поддержание оптимальных влагозапасов воды ( $W_{opt}$ ) в некотором диапазоне увлажнения. При использовании современных систем капельного полива или внутрпочвенного орошения в условиях плодового сада, на наш взгляд, технически достижимо поддерживать влагосодержание почвы в диапазоне легкодоступной влаги, что способствует максимальному развитию культуры при оптимальном тепловом и пищевом режимах почвы. Для чернозема выщелоченного Алтайского Приобья вариабельность влагозапасов в диапазоне легкодоступной влаги относительно  $W_{opt}$  составляет  $\pm 20\%$ . Уменьшение среднеквадратичного отклонения колебания влажности почвы ( $\sigma_w$ ) относительно  $W_{opt}$  при регулировании водного режима позволит повысить урожайность культуры, т.к. растение будет подвержено водному стрессу в меньшей мере, чем при значительных величинах  $\sigma_w$ . В предельном случае при  $\sigma_w \rightarrow 0$  продуктивность максимальна. Исследуем изменение относительной продуктивности яблони и груши в условиях Алтайского Приобья при  $\sigma_w = \sigma_t = \pm 20\%$  от  $W_{opt}$  и  $t_{opt}$  (рис. 34-39). Это позволит выработать практические рекомендации регулирования гидротермического режима под плодовыми насаждениями в данной почвенно-климатической зоне.

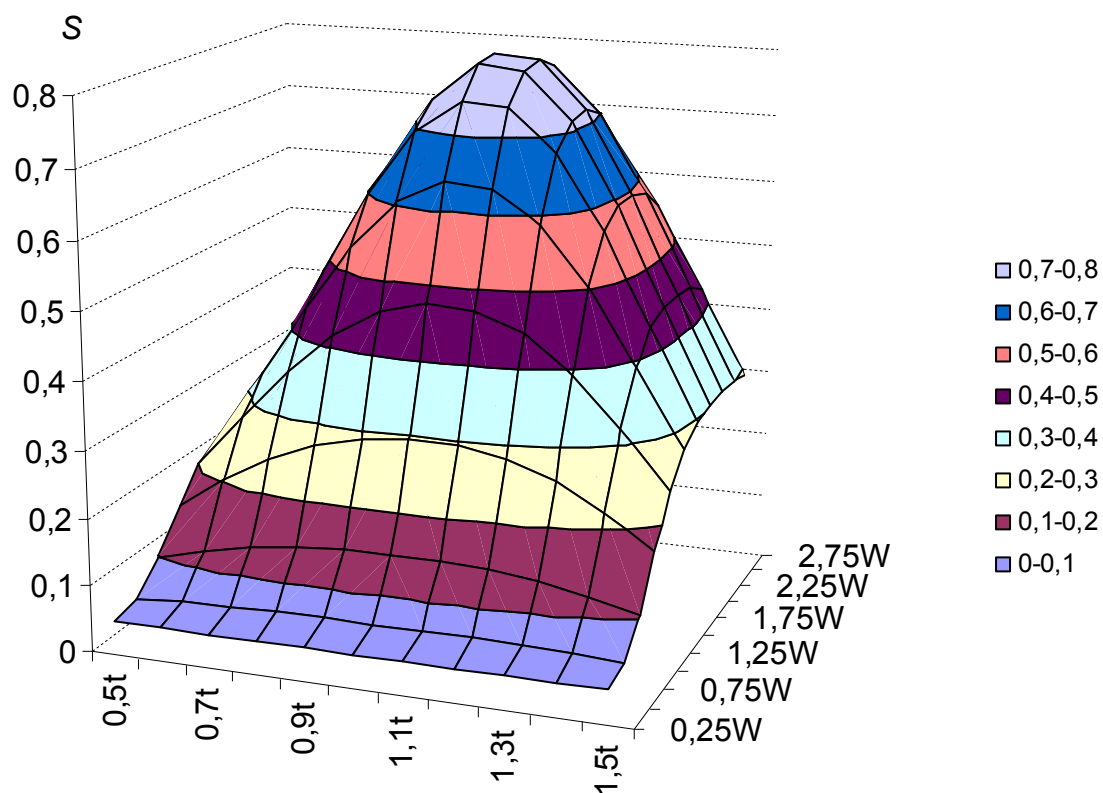


Рис. 34. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,2W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,2t_{opt}$ .

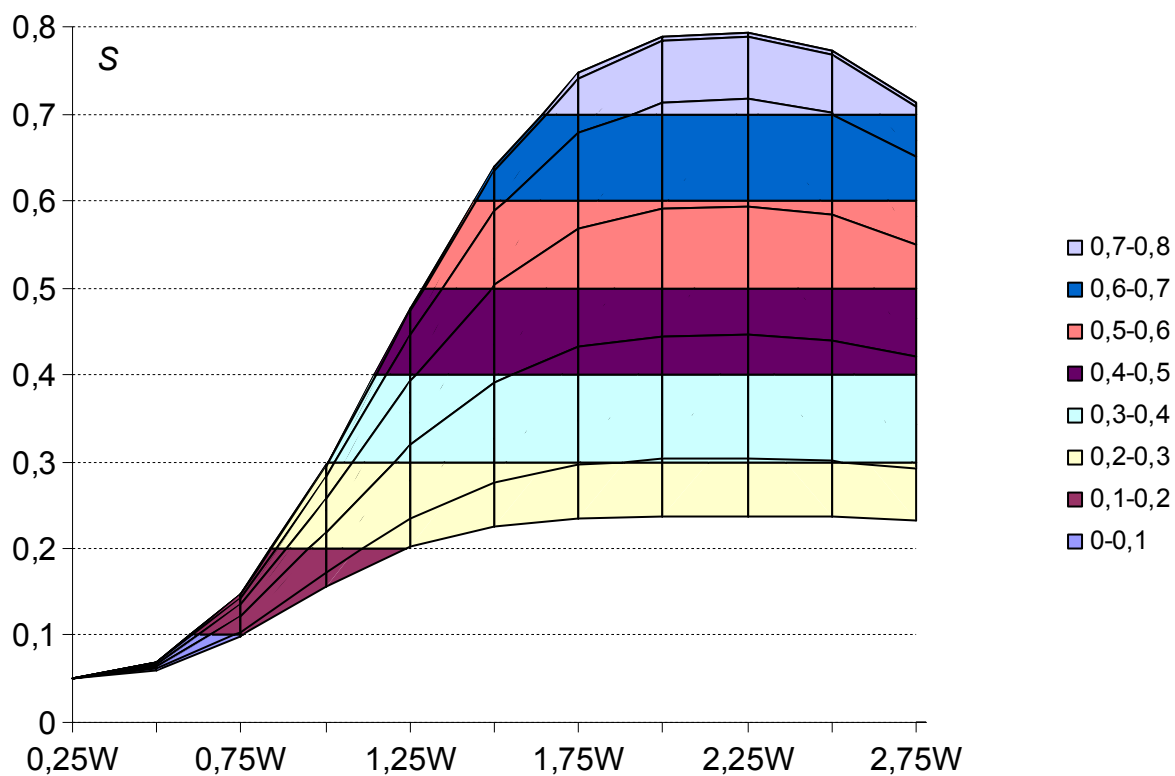


Рис. 35. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,2W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,2t_{opt}$ . Плоскость продуктивных влагозапасов (изометрия).

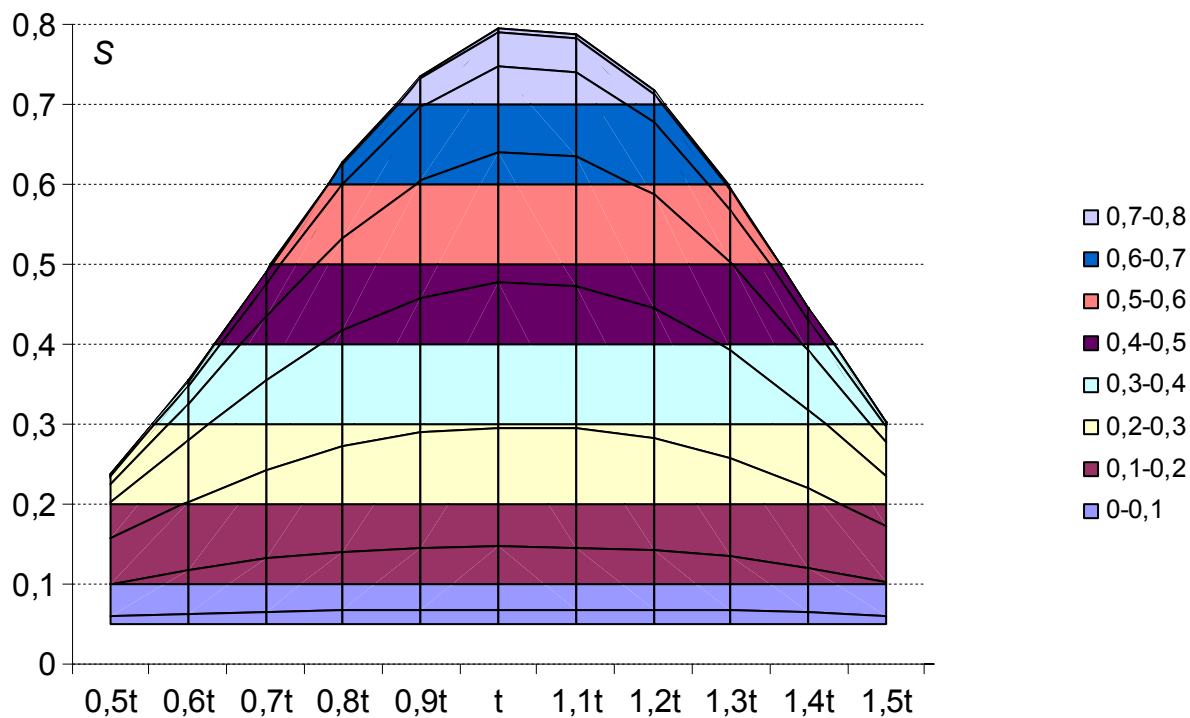


Рис. 36. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,2W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,2t_{opt}$ . Плоскость температуры (изометрия).



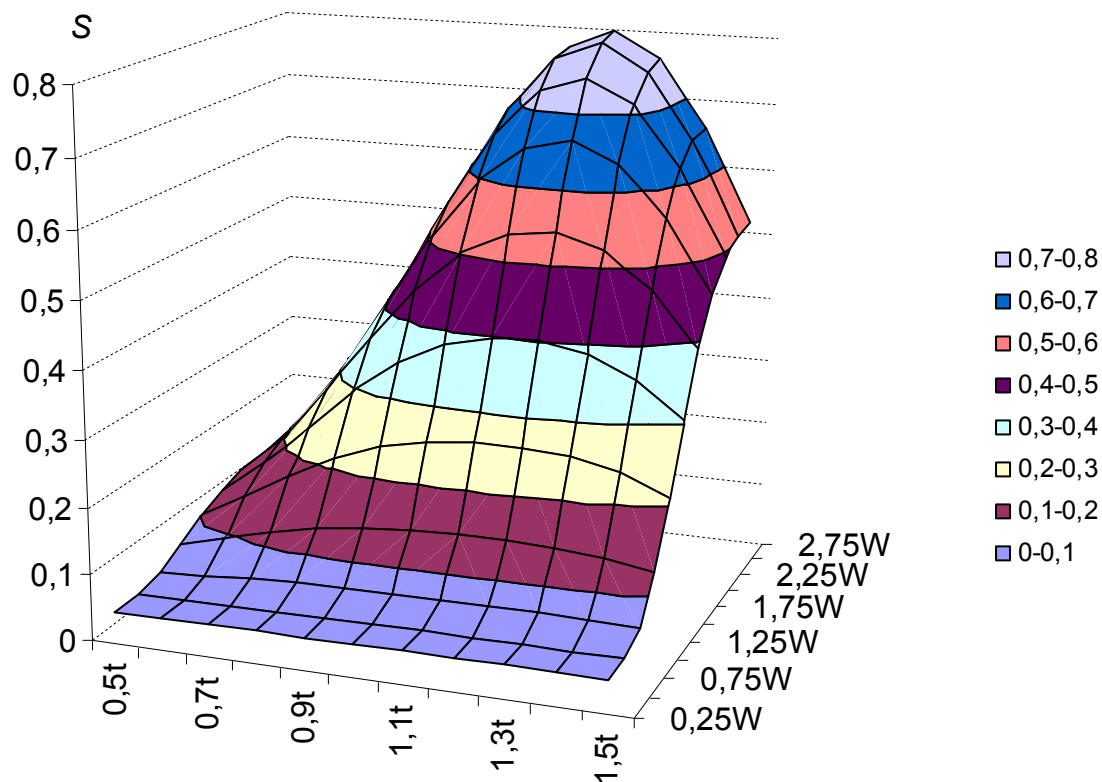


Рис. 37. Зависимость средней продуктивности группы при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,2W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,2t_{opt}$ .

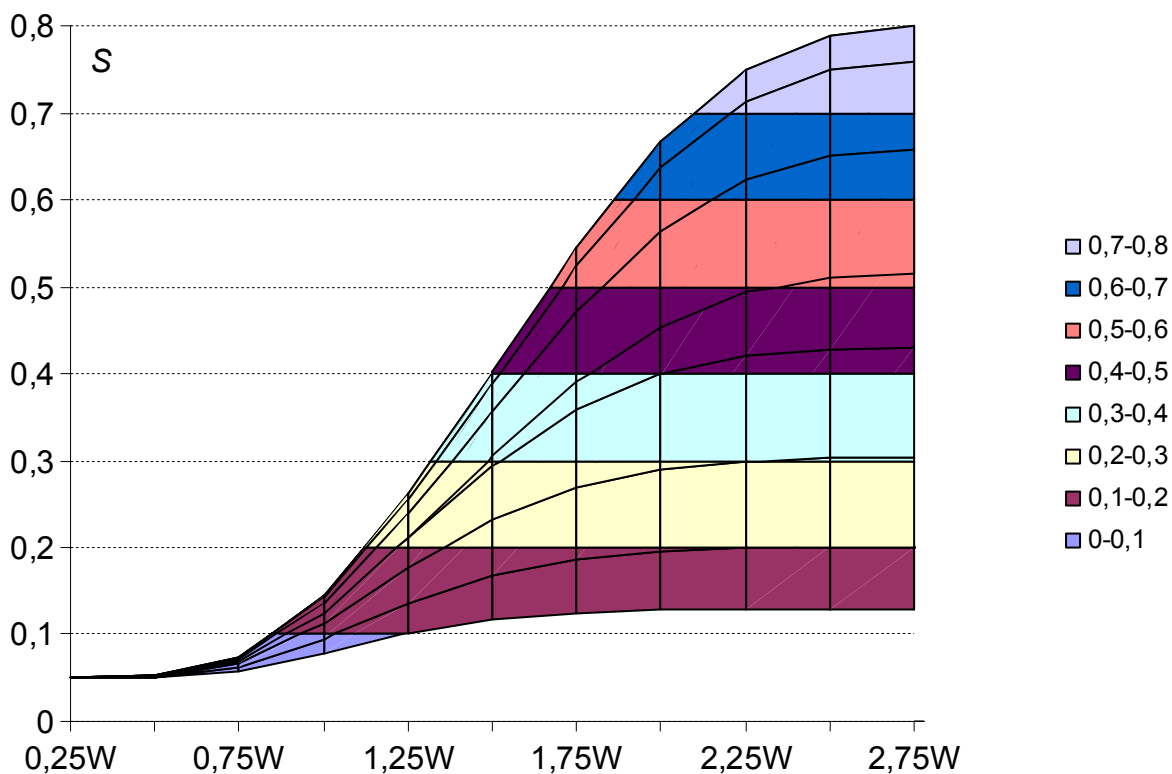


Рис. 38. Зависимость средней продуктивности груши при изменении температуры и влажности почвы. Плоскость продуктивных влагозапасов (изометрия),  $\sigma_W = 0,2W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,2t_{opt}$ .

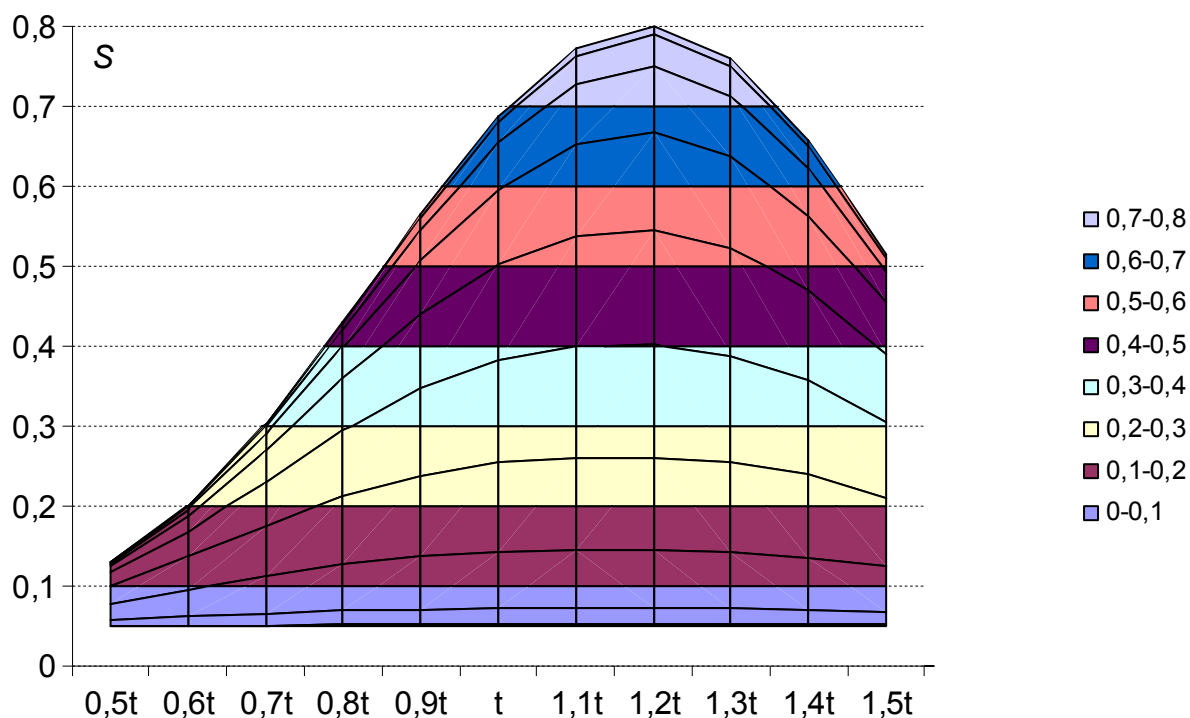


Рис. 39. Зависимость средней продуктивности груши при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,2W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,2t_{opt}$ . Плоскость температуры (изометрия).

Анализируя рисунки 34-39 можно сделать вывод, что при уменьшении  $\sigma_W$  и  $\sigma_t$  от величин, полученных для естественных условий до значений  $\sigma_W = 0,2W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,2t_{opt}$  при условии применения средних факторов среды (почвы) найденных выше ( $2,25 \cdot W_{opt}$  для яблони и  $2,75 \cdot W_{opt}$ ,  $1,2 \cdot t_{opt}$  для груши) средняя продуктивность плодовых насаждений увеличивается до 80% от максимально возможной урожайности. При этом для данного варианта гидротермического режима чувствительность продуктивности культур к изменению продуктивных влагозапасов и температур почвы уменьшилась в области низких значений продуктивности. Для достижения максимальной продуктивности среднеквадратическое отклонение от средних значений

изучаемых факторов было уменьшено до 10%. Результаты моделирования представлены на рисунках 40-45.

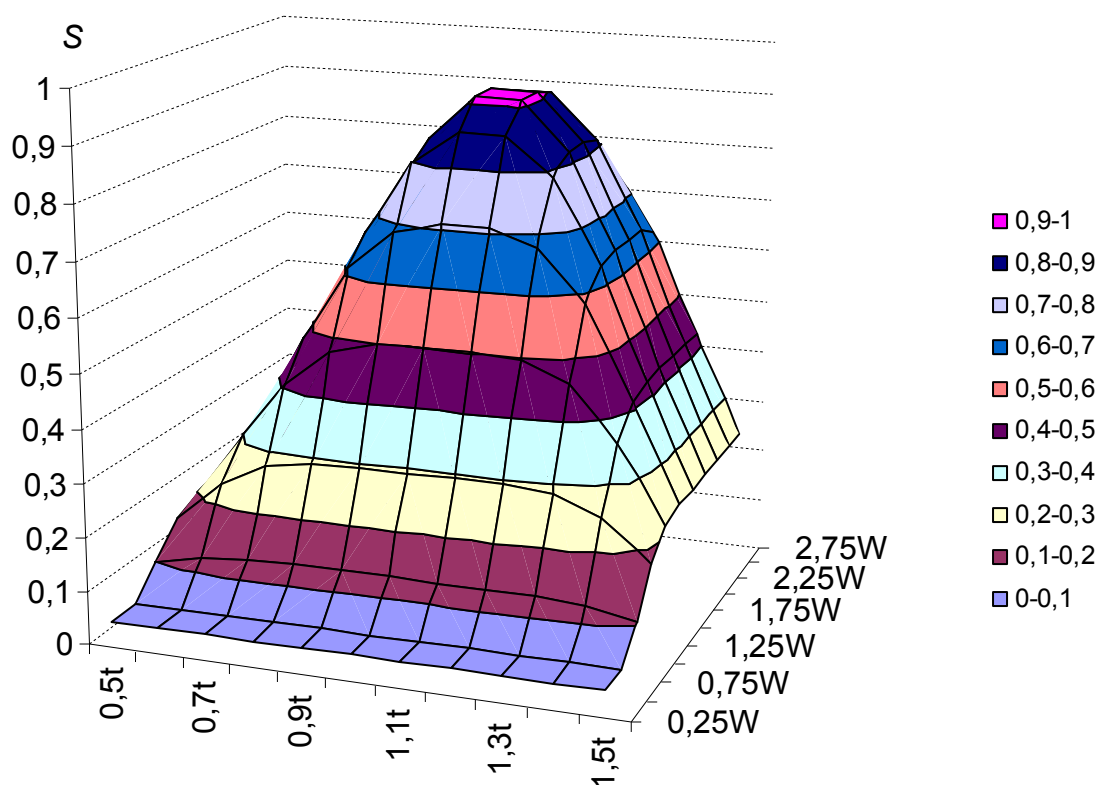


Рис. 40. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,1W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,1t_{opt}$ .

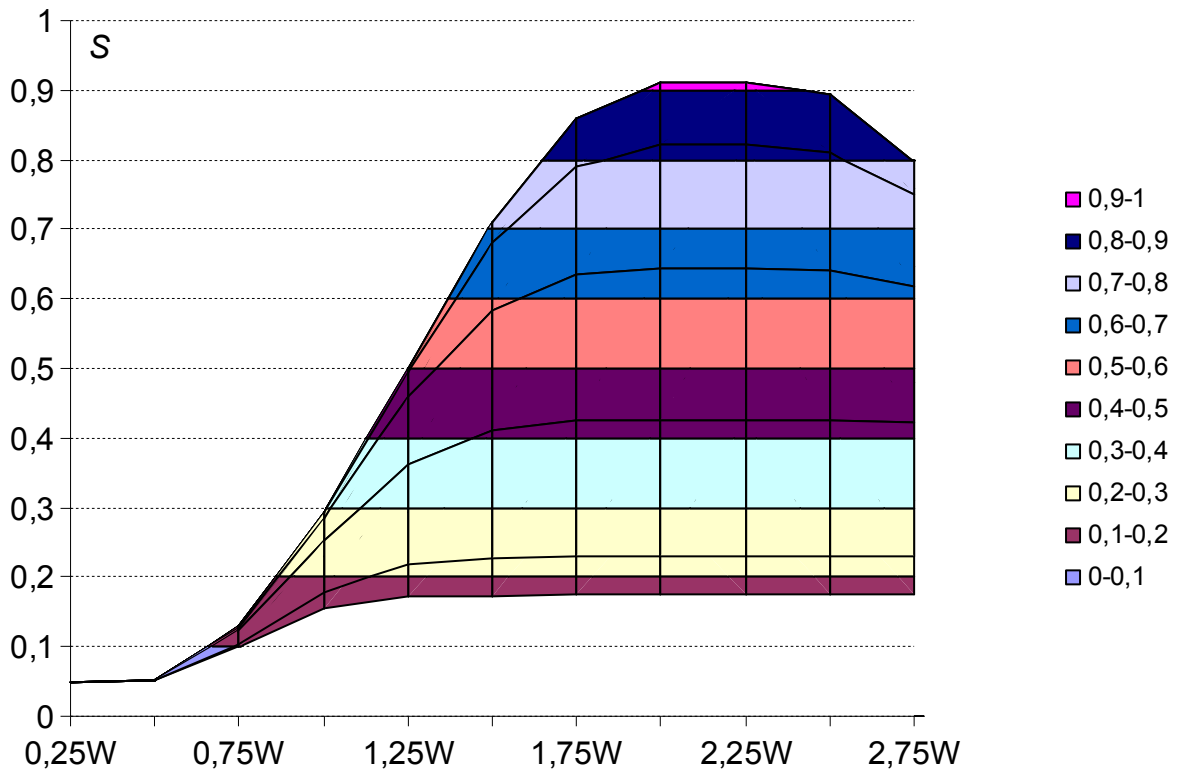


Рис. 41. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы. Плоскость продуктивных влагозапасов (изометрия),  $\sigma_W = 0,1W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,1t_{opt}$ .

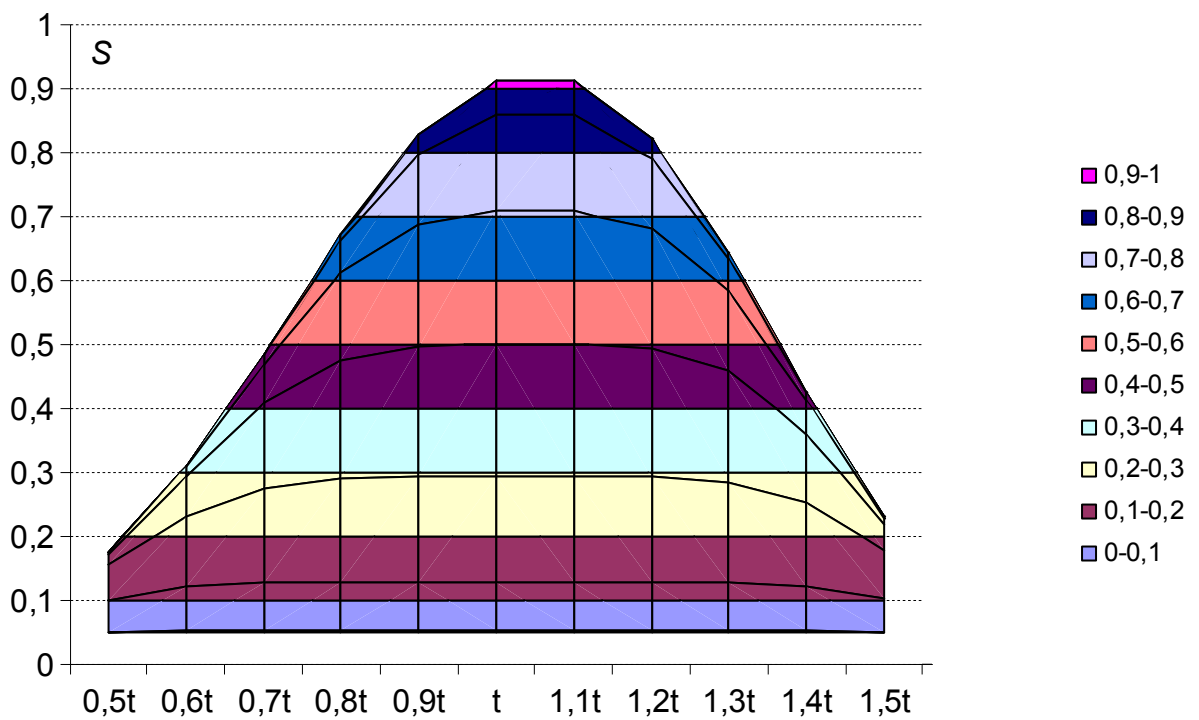


Рис. 42. Зависимость средней продуктивности яблони при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,1W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,1t_{opt}$ . Плоскость температуры (изометрия).

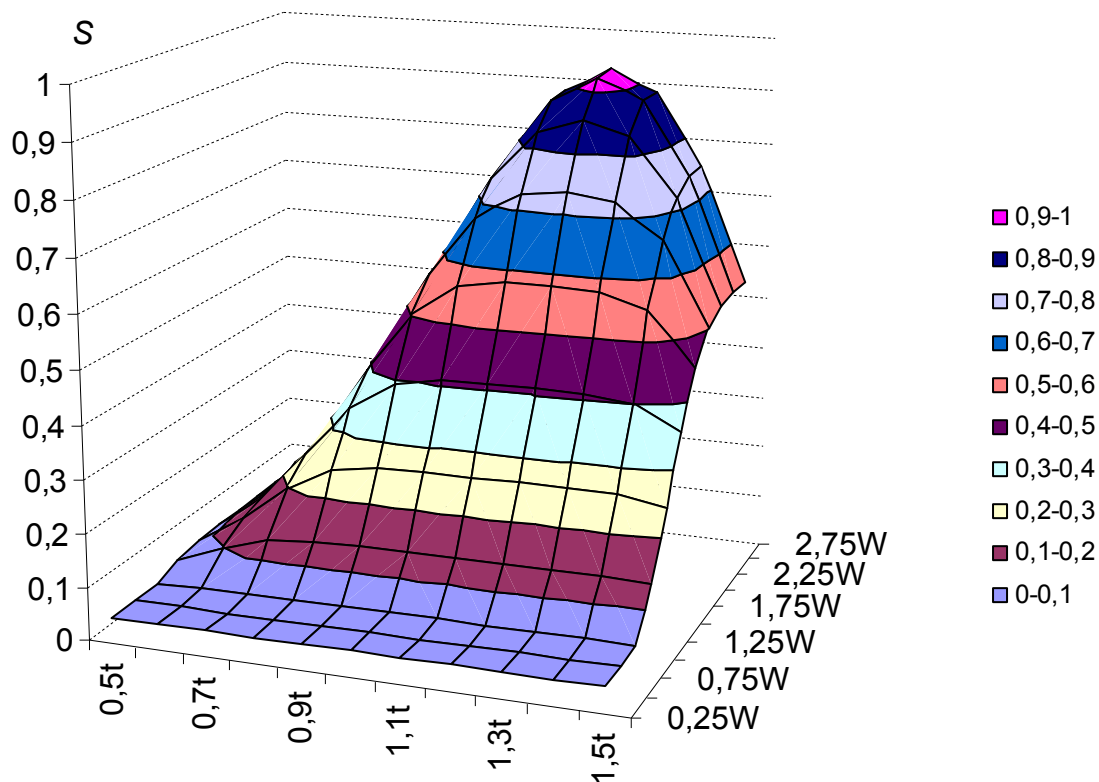


Рис. 43. Зависимость средней продуктивности груши при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,1W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,1t_{opt}$ .

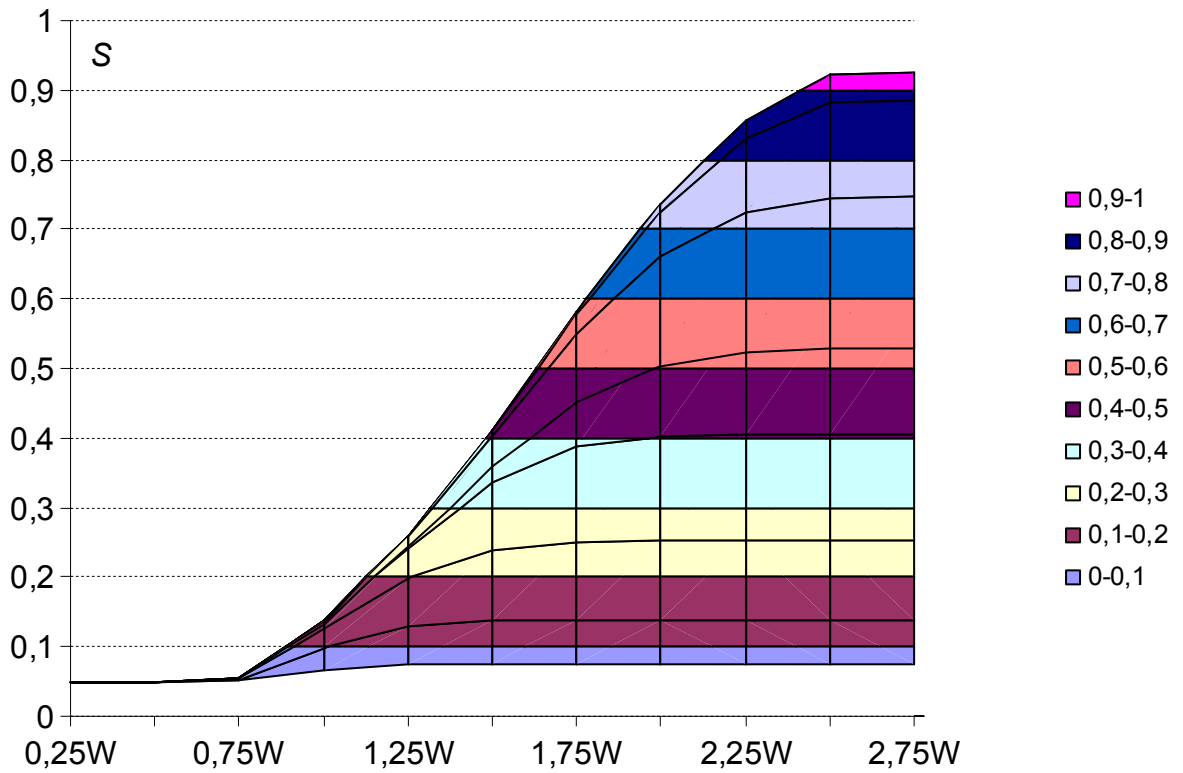


Рис. 44. Зависимость средней продуктивности группы при изменении температуры и влажности почвы. Плоскость продуктивных влагозапасов (изометрия),  $\sigma_W = 0,1W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,1t_{opt}$ .

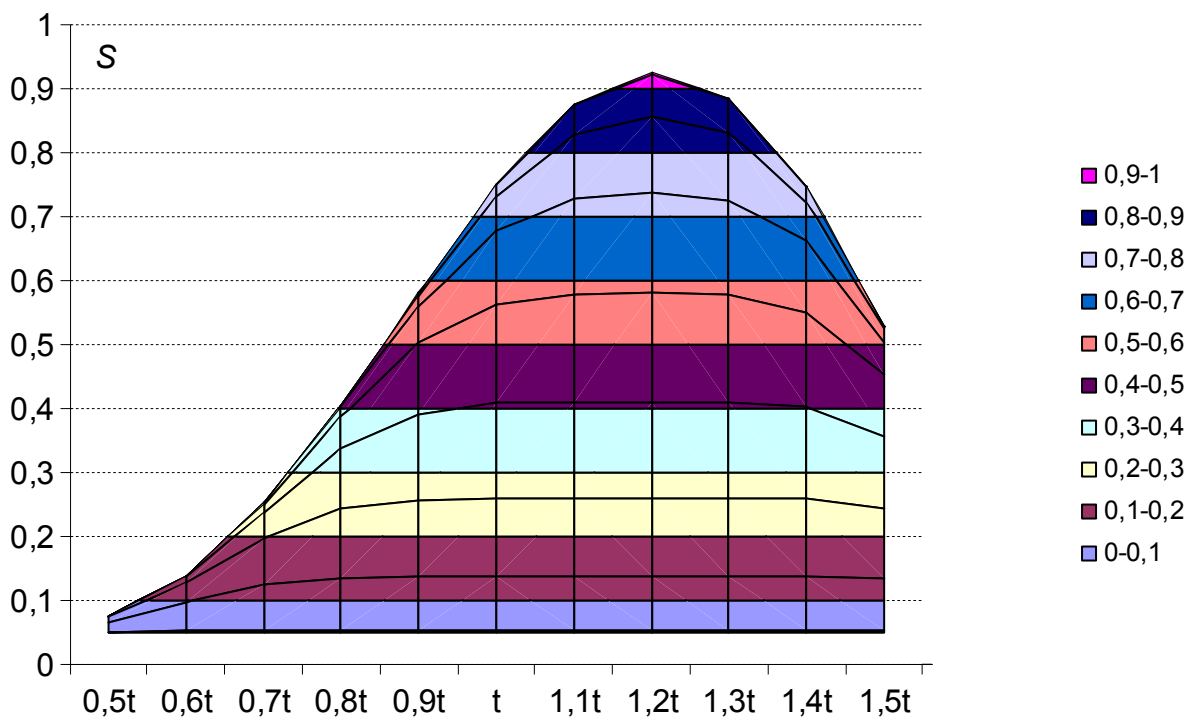


Рис. 45. Зависимость средней продуктивности груши при изменении температуры и влажности почвы,  $\sigma_W = 0,1W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,1t_{opt}$ . Плоскость температуры (изометрия).

При уменьшении  $\sigma_W$  и  $\sigma_t$  до значений  $\sigma_W = 0,1W_{opt}$ ,  $\sigma_t = 0,1t_{opt}$  при условии применения средних факторов среды (почвы) найденных выше ( $2,25 \cdot W_{opt}$  для яблони и  $2,75 \cdot W_{opt}$ ,  $1,2 \cdot t_{opt}$  для груши) средняя продуктивность плодовых насаждений может достигать 90% от максимально возможной урожайности, что можно считать приемлемым при регулируемом практически реализуемом отклонении гидротермического режима почвы от оптимальных факторов среды. Также можно отметить, что дальнейшее уменьшение  $\sigma$  привело к еще большему уменьшению чувствительности продуктивности культур к изменению продуктивных влагозапасов и температуры почвы в области низких значений продуктивности, что связано с увеличением крутизны «купола продуктивности».

Итак, средняя за десятилетие продуктивность яблони в естественных условиях Алтайского Приобья составляет 20-30% от максимально возможной а груши 25%. Для достижения максимальной продуктивности плодовых культур в условиях Алтайского Приобья необходимо увеличить продуктивные влагозапасы в 2,3 и 2,8 раза для яблони и груши соответственно, при этом размах их отклонений от оптимального уровня не должен превышать  $\pm 10\%$ . В данном случае средняя продуктивность плодовых насаждений может достигать 90% от максимально возможной урожайности, что можно считать приемлемым при регулируемом практически реализуемом отклонении гидротермического режима почвы от оптимальных факторов среды.

## ВЫВОДЫ

1. Исследуемый чернозем имеет среднесуглинистый, близкий к тяжелосуглинистому иловато-крупнопылеватый гранулометрический состав. Обладает высокой степенью агрегирования, легко впитывает и удерживает влагу, что способствует созданию благоприятных условий для обеспечения плодовых насаждений влагой и воздухом.

2. Независимо от обеспеченности влагой по годам величины влагозапасов под яблоней в весенне-летний период имеют меньшие значения, чем под грушой, в то время как осенью эти значения под яблоней превышают аналогичные параметры под грушей.

3. Влагообеспеченность чернозема выщелоченного плодового сада не позволяет получать полноценные урожаи фруктов в условиях Алтайского Приобья. Так, значения вероятностей оптимальных влагозапасов для яблони и груши в слое 0-100 см составляет 0,067 и 0,028 соответственно.

4. Наиболее вероятные значения температур почвы на глубине 20 см являются оптимальными для роста и развития яблоневого и грушевого культур. На глубине 50 см наиболее вероятные температуры почвы несколько ниже оптимальных значений, а так как основная доля корней плодовых культур расположена в слое 20-60 см, то для обеспечения высоких урожаев фруктов необходимо предусмотреть подогрев поливной воды, например в прудах-накопителях.

6. Модельные расчеты показали, что в среднем за вегетационный период в условиях Алтайского Приобья необходимо проводить 12-17 поливов яблоневого культур через 5-9 дней нормой  $200 \text{ м}^3/\text{га}$ .

7. Суммарное водопотребление яблоневого насаждений при проведении модельных оросительных мелиораций возрастает в 3 раза, увеличиваясь с  $2274 \text{ м}^3/\text{га}$  до  $6563 \text{ м}^3/\text{га}$ , при этом коэффициент вариации уменьшается в 2 раза, что говорит о положительном влиянии орошения на вариабельность водного режима, и в конечном счете, благотворно действует на развитие растения, снижая вероятность возникновения водного стресса у него.



8. Полученные биоклиматические коэффициенты Алпатьева можно применять при расчете поливных норм плодовых культур в условиях Алтайского Приобья при отсутствии инструментального контроля предполивного порога влажности почвы.

9. Средняя за десятилетие продуктивность яблони и груши в естественных условиях Алтайского Приобья составляет 20-30% от максимально возможной.

10. Для достижения максимальной продуктивности плодовых культур в условиях Алтайского Приобья необходимо увеличить влагозапасы в 2,3 и 2,8 раза для яблони и груши соответственно, при этом отклонение от оптимального уровня не должно превышать  $\pm 10\%$ . В данном случае средняя продуктивность плодовых насаждений может достигать 90% от максимально возможной урожайности, что можно считать приемлемым при регулируемом практически реализуемом отклонении гидротермического режима почвы от оптимальных факторов среды.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ**

Для достижения максимальной продуктивности плодовых культур в условиях Алтайского Приобья необходимо в среднем за вегетационный период проводить 12-17 поливов яблоневых культур через 5-9 дней нормой  $200 \text{ м}^3/\text{га}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Алтайского края. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 156 с.
2. Алексеева С.Ф., Шульгин А.М. Почвенно-климатические ресурсы Алтайского края / Климат почвы: тез. докл. совещ. научного совета по изучению климатич. и агроклиматич. ресурсов. – Гидрометеиздат, 1971. – С. 87-94.
3. Алиев Д.А. Фотосинтетическая деятельность, минеральное питание и продуктивность растений: автореф. дисс... д-ра с.-х. наук / Д.А. Алиев. – Баку, 1971. – 60 с.
4. Алпатьев А.М., Алпатьев С.М. Методические указания по расчетам режима орошения сельскохозяйственных культур на основе биоклиматического метода. – Киев, 1967. – 32 с.
5. Алпатьев С.М. Поливной режим сельскохозяйственных культур в южной части Украины // Доклад-реферат работ, представленных на соискание уч. ст. д-ра с.-х. наук. – Киев, 1965.
6. Архангельская Т.А. Температуропроводность серых лесных почв Владимирского ополья // Почвоведение. – 2004. – № 3. – С. 332–342.
7. Архангельская Т.А. Генезис сезоннопромерзающих серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом (на примере Владимирского ополья) // Криосфера Земли, 2003, №1, т.7, с.39-48.
8. Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове / Т.А. Архангельская: автореф. дис. доктора биол. наук. – Москва, 2008. – 50 с.
9. Архангельская Т.А. Температурный режим комплексного почвенного покрова. – М.: ГЕОС, 2012. – 282 с.
10. Архангельская Т.А., Умарова А.Б. Температуропроводность и температурный режим модельных дерново-подзолистых почв в больших лизиметрах Почвенного стационара МГУ // Почвоведение. – 2008. – № 3. С. – 311-320.

11. Ахмедов, А.Д. Экологическая безопасность развития садоводства в Волгоградской области /А.Д. Ахмедов, Е.Ю. Галиуллина // Социально - экономические и природоохранные аспекты развития сельских муниципальных образований: материалы междунар. науч.-практ. конф. ГНУ ПНИИАЗ. - М., 2010. – С. 271-273.
12. Багров М.Н. Орошение полей. Волгоград: Н.-Волжск. Изд. 1965. - 253 с.
13. Багров М.Н., Кружилин И.П. Прогрессивная технология орошения сельскохозяйственных культур. – М.: Колос, 1980. – С. 20 - 42.
14. Бакаленко Б.И., Исследование чувствительности динамической модели продуктивности зерновых культур к почвенно-гидрофизической информации. [Текст] / И.Б. Бакаленко, А.М. Глобус, Р.А. Полуэктов // Метеорология и гидрология 2008 - №9, С.94-101.
15. Бобарыкин Н.Д. Система управления влажностью почвы, включая информационное обеспечение, на основе решения трехмерной обратной задачи / Н.Д. Бобарыкин, Е.Н. Графеева, Р.Е. Седов // Теоретические и прикладные аспекты современной науки 2014 - №5-1 С. 20-23.
16. Болотов А.Г. Расчет энергии водоудерживающей способности почвы // Вестник АГАУ, 2014. – № 10. – С. 26-29.
17. Болотов А.Г., Дубский С.Н., Кузнецов Е.Н., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н. Чувствительность имитационной модели водного режима почв к краевым условиям // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. статей X Междунар. науч.-практ. конф. (4-5 февраля 2015 г.): в 3 кн. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2015. – Кн. 2. – С. 353-354.
18. Болотов А.Г., Дубский С.Н., Шаталов Александр Н., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н., Кузнецов Е.Н., Гончаров И.А., Гончаров Н.А. Моделирование основной гидрофизической характеристики черноземов Алтайского края // Вестник АГАУ, 2015. – № 2. – С. 31-35.

19. Болотов А.Г., Шаталов А.Н., Бутырин И.Н., Гончаров И.А., Гончаров Н.А. Моделирование режима влажности почв // Современные научные исследования: инновации и опыт: сб. статей VII Междунар. науч.-практ. конф. (27-30 декабря 2014 г.): – Екатеринбург: Изд-во «Наука и образование», 2014. – С. 20-22.
20. Болотов А.Г., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н. Основные гидрофизические характеристики каштановых почв сухой степи Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2014. – № 9. – С. 36-41.
21. Болотов, А.Г. Измерение температуры почвы с помощью технологии 1-WIRE // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2012. – № 11. – С. 29-30.
22. Болотов, А.Г. Теплофизическое состояние почв и совершенствование инструментальной базы для его исследований: дис... канд. с.-х. наук. – Барнаул, 2003. – 148 с.
23. Болотов, А.Г., Беховых Ю.В., Семенов Г.А. Определение теплофизических свойств капиллярно-пористых тел импульсным методом с использованием технологии визуального программирования // Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае. – Барнаул: Вестник АГАУ. – 2010. – № 6. – С. 37-40.
24. Болотов, А.Г., Макарычев С.В., Левин А.А. Применение цифровых датчиков при измерении температуры почв // Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2005. – С. 159-161.
25. Бурлакова Л.М. Плодородие Алтайских черноземов в системе агроценоза / Л.М. Бурлакова. – Новосибирск: Наука СО, 1984. – 88 с.
26. Бурлакова Л.М., Татаринцев Л.М., Рассыпнов В.А. Почвы Алтайского края: Учеб. пособие. Барнаул: АлтСХИ, 1988. – 72 с.
27. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.

28. Васильев В.И. Сравнение математических моделей тепломассопереноса в почвогрунтах [Текст] / В.И. Васильев, Ю.Г.
29. Ветренко Е.А. Моделирование влагопереноса в ненасыщенных почвогрунтах при внутрпочвенном орошении яблоневого сада [Текст] / Е.А. Ветренко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование 2014 - №4 С. 219-222.
30. Воробьев С.А., Буров Д.И. Общее земледелие. Издательство "Колос", Москва – 1964.
31. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1986. – 244 с.
32. Воронина П.В. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS [Текст] / П.В. Воронина, Е.А. Мамаш // Вычислительные технологии 2014 – Том 19 №3 С. 76-102.
33. Воротынцев А.В. Приближенная модель переноса тепла и влаги в системе почва-растение с учетом баланса энергии [Текст] / А.В. Воротынцев // Вестник Бурятского государственного университета 2014 - №9-1 С. 22-26.
34. Галиуллина Е. Ю. Капельное орошение яблоневого сада в условиях сухостепной зоны Волгоградской области. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Волгоград – 2015
35. Герайзаде А.П. Термо- и влагоперенос в почвенных системах / А.П. оглы Герайзаде. - Баку : Элм, 1982. - с. 157.
36. Гефке И.В. Анализ теплофизического состояния почвенного профиля [Текст] / И.В. Гефке, С.Ю. Бондаренко, С.В. Макарычев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета 2007 - №10 С. 13-18.
37. Гефке И.В. Теплофизическое состояние выщелоченных черноземов Алтайского Приобья в условиях плодового сада [Текст] / Гефке И.В. // автореф. дис. ... канд. с-х.. наук. – Барнаул, 2007. – 20с.
38. Глобус А.М., Бодров В.А. Применение машинного эксперимента для оценки влияния гидрофизических свойств почв на урожай и почвенный

влагозапас и для уточнения требований к методам определения этих свойств [Текст] / А.М. Глобус, В.А. Бодров// Труды АФИ, 1982 - С. 45-62.

39. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987, 428с.

40. Глобус А.М. Системный подход к почвенно-гидрофизическому обеспечению агроэкологических математических моделей. [Текст] / А.М. Глобус// Почвоведение 1984 - №10, С. 53-59.

41. Голованов А.И., Балан А.Г., Ермакова В.Е., Ефимов И.Т. Мелиоративное земледелие. Москва, Агропромиздат 1986.

42. Гончарова Л.А. Сибирские яблони / Л.А. Гончарова. – Новосибирск, 2002. – 158 с.

43. Горин Т.И. Орошение плодовых деревьев в зависимости от фаз их роста и развития // Сад и огород. 1955. - № 8. - С. 15.

44. Григоров, М.С. Современные перспективные водосберегающие способы полива в Нижнем Поволжье /М.С. Григоров, А.С. Овчинников, Е.П. Боровой, А.Д. Ахмедов // Волгоград: ВГСХА «Нива», 2010. – 244 с.

45. Гриневский С.О. Влияние рельефа на формирование инфильтрационного питания подземных вод [Текст] / С.О. Гриневский // Вестник Московского университета. Серия 4: ГЕОЛОГИЯ 2014 - №1 С. 54-60.

46. Гриневский С.О. Схематизация строения и параметров зоны аэрации для моделирования инфильтрационного питания подземных вод [Текст] /С.О. Гриневский // Вестник Московского университета. Серия 4: ГЕОЛОГИЯ 2010 - №6 С. 56-67.

47. Данилов, И.С. Еремеев // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова 2013 – Том 10 №4 С. 5-10.

48. Демченко П.Ф. Применение современных методов статистической физики для описания флуктуаций влагозапаса почвы [Текст]

/ П.Ф. Демченко, Л.Д. Краснокутская // Водные ресурсы 2013 – Том 40 №2 С. 40.

49. Димо, В.Н. Агрофизическая характеристика почв Восточного Забайкалья [Текст] / В.Н. Димо Агрофизическая характеристика почв нечерноземной зоны Азиатской части СССР. – М.: Колос, 1978. – С. 134-173.

50. Димо, В.Н. Тепловой режим почв СССР [Текст]. – М., Колос, 1972. – с. 359.

51. Добрынин И.С. Рост, зимостойкость и плодоношение яблони в условиях орошения степной зоны Хакасии. Автореф к.с.-х.н, Новосибирск, 1973.

52. Дудникова Л.Г., Марков Ю.А. Режим орошения садов в Приазовской зоне. Новочеркасск: НИМИ им. Картунова. 1989. - С 13-14.

53. Дудникова Л.Г., Сафаров Ф.С. Особенности режима орошения плодовых в условиях дефицита воды // Реф. ж. Орошение сельскохозяйственных культур. М. ВНИИТЭИагропром. 1990. - №6. - С. 5.

54. Ефремов В.Ю. Реализация математической модели температурного поля в осушаемом массиве польдерных систем [Текст] / В.Ю. Ефремов, Н.Д. Бобарыкин // Математическое моделирование 2012 – Том 24 №5 С. 131-136.

55. Завадский Д.О. Капельное орошение молодого яблоневого сада и виноградников в условиях центральной зоны Краснодарского края: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. технич. наук. Краснодар. -1991. С. 62-71.

56. Затицацкий С.В. К вопросу о применимости SWAP-модели при исследовании динамики влагозапасов в условиях саратовского Заволжья [Текст] / С.В. Затицацкий, Т.А. Панкова, О.В. Михеева // Аграрный научный журнал 2011 - №3 С.28-31.

57. Калинина И.П. Развитие садоводства / И.П. Калинина // Материалы III съезда специалистов и передовиков сельского хозяйства Алтайского края. Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1970. С. 163-168.



58. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел [Текст] / Г. Карслоу, Е. Егер - М.: Наука, 1964 - с. 486.
59. Кашперюк А.А. Обоснование и некоторые особенности разработки модели и методики мониторинга по определению тепловлагодпереноса в грунтах в городских условиях [Текст] / А.А. Кашперюк, А.Д. Потапов // Вестник МГСУ 2013 - №12 С.68-76.
60. Кащенко Н.М. Моделирование эффектов аномальной диффузии для дренажных систем [Текст] / Н.М. Кащенко, М.А. Никитин // Математическое моделирование 2013 – Том 25 №12 С. 44-49.
61. Квачантирадзэ Э.П. Теоретическая модель реконструкции влагозапасов почвы по среднеголетним значениям температуры и влажности воздуха, а также пористости почвы [Текст] / Э.П. Квачантирадзэ // Международный технико-экономический журнал 2014 - №3 С. 85-88.
62. Кирста Ю.Б. Моделирование влагообмена в почвах Сибири [Текст] / Ю.Б. Кирста // Ползуновский вестник, 2004 - №2. – С. 205-213.
63. Костяков, А.Н. Основы мелиорации [Текст]. – М.: Сельхозгиз, 1960. – 622 с.
64. Кружилин, И.П. Агромелиоративная оценка влагообеспеченности территории Нижнего Поволжья / И.П. Кружилин. – Волгоград, 1976. – 66 с.
65. Крылов Д.А. Математическое моделирование распределения температурных полей [Текст] / Д.А. Крылов, Н.И. Сидняев, А.А. Федотов // Математическое моделирование 2013 – Том 25 №7 С. 3-27.
66. Кулыгин В. А. Биоклиматические коэффициенты картофеля и овощных культур в Ростовской области / В. А. Кулыгин. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, № 4 (12) 2013 г., С. 81-92
67. Куртнер Д.А., Решетин О.Л. Об одном решении уравнения теплопроводности в связи с расчетом температуры почвы / Д.А. Куртнер // Сборник трудов по агрономической физике, 1970. Л.: -Гидрометеиздат, Вып. 26. - С. 38-45.

68. Куртнер Д.А., Чудновский А.Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв / Д.А. Куртнер, А.Ф. Чудновский - Л.: Гидрометеоиздат, 1979 – 231 с.
69. Лавров С.А. Процессы тепло-влажнопереноса в почвенно-грунтовой толще и снежном покрове. [Текст]: дис. д-ра тех. наук: 25.00.27 / Лавров Сергей Алексеевич. - СПб., 2000. - 259 с.
70. Литвиненко А.Ф. Дождевание садов на фоне дерново-перегнойной системы содержания почвы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 1986. - С. 78-86.
71. Макарычев С.В. Объектно-ориентированное моделирование процессов теплопередачи в почве / С.В. Макарычев, Я.О. Дианов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета 2005 – Том 17 №1 С. 15-18.
72. Макарычев С.В. Теплофизические свойства черноземов выщелоченных Алтайского Приобья и их математические модели / С.В. Макарычев, А.Г. Болотов, И.В. Гефке, А.Н. Шаталов // Вестник Алтайской науки 2010 - №1 С. 95-100.
73. Макарычев С.В., Болотов А.Г., Гефке И.В., Гончаров И.А., Гончаров Н.А. Основная гидрофизическая характеристика черноземов выщелоченных Алтайского Приобья в условиях сада // Вестник АГАУ, 2014. – № 12. – С. 35-39.
74. Макарычев, С.В. Гидротермический режим чернозема под цветочными культурами в условиях Алтайского Приобья: монография / С.В. Макарычев, И.А. Бицошвили. – Барнаул: РИО АГАУ, 2013. – 104с.
75. Макарычев, С.В. Способ определения удельной теплоемкости почв [Текст] / С.В. Макарычев. // Патент РФ, № 4914260. – М. 1993, - 4 с.
76. Макарычев, С.В. Теплофизика почв: методы и свойства / С.В. Макарычев, М.А. Мазиров. – Суздаль, 1996. – 231 с.
77. Макарычев, С.В. Теплофизическая характеристика генетических горизонтов черноземов выщелоченных / С.В. Макарычев, С.В. Величкина //

Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае: сб. науч. тр. – Барнаул, 2005. – С. 95-104.

78. Макарычев, С.В. Теплофизические основы мелиорации почв: учебное пособие / С.В. Макарычев. – Барнаул: Изд-во АГАУ. 2005. – 279 с.

79. Макарычев, С.В. Теплофизические основы мелиорации почв: учебное пособие / С.В. Макарычев, М.А. Мазиров. – Издательство «Химия в сельском хозяйстве» Москва, 2004. – 290 с.

80. Макарычев, С.В. Теплофизические свойства выщелоченных черноземов Алтайского Приобья: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. биолог. наук / С.В. Макарычев. – Новосибирск 1980. – 24 с.

81. Макарычев, С.В. Теплофизические свойства почв Юго-Западной Сибири: автореф. дис... д-ра биол. наук / С.В. Макарычев. – М., 1993. – 34 с.

82. Макарычев, С.В. Теплофизическое состояние почв Алтая в условиях антропогенеза / С.В. Макарычев. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 326 с.

83. Макарычев, С.В. Теплофизическое состояние чернозёмов плодовых садов Алтайского Приобья: монография / С.В. Макарычев, И.В. Гэфке, А.В. Шишкин. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. – 191с.

84. Макарычев, С.В. Термический режим выщелоченного чернозема Алтайского Приобья в зависимости от характера агроценоза / С.В. Макарычев // Водно-пищевой режим почв и его регулирование при возделывании сельскохозяйственных культур в Алтайском крае: сб. науч. тр./ АСХИ. – Барнаул, 1981, – С. 24-32.

85. Макарычев, С.В. Формирование режима тепла и влаги в черноземах Приобья при разных способах обработки / С.В. Макарычев, С.В. Величкина // Вестник АГАУ, – Барнаул. – 2003, - № 4 (12) – С. 16-21.

86. Макарычев, С.В. Экспресс-метод для определения удельной теплоемкости почв / С.В. Макарычев // Тез. III съезда Докучаевского общества почвоведов. – Вып. 4. – М. 2000, – С. 64-68.

87. Малышева Г.М. Режим орошения плодоносящего семечкового сада в Саратовском Заволжье: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата с.-х. наук. Саратов. - 1968. - 20 с.

88. Мамин В.Ф. Почвенно-мелиоративные основы выращивания промышленных садов в Волгоградском Заволжье при поливе затоплением: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата с.-х. наук. Волгоград. 1970. - 22 с.

89. Мартянова, Г.Н. Некоторые особенности теплового режима почв Онон-Аргунской степи / Г.Н. Мартянова // Климат почвы: доклады совещания научного совета по изучению климатических и агроклиматических ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1971, – С. 103-109.

90. Мельников В.Н. Режим орошения однолетних подвоев яблони на светло-каштановых легко-суглинистых почвах: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. с.-х. наук. Волгоград. 1977. - С. 60 - 85.

91. Микайылов Ф.Д., Шеин Е.В. Теоретические основы экспериментальных методов определения температуропроводности почв // Почвоведение. – 2010. – № 5. – С. 597-605.

92. Микайылов Ф.Д. Некоторые вопросы моделирования температурного режима почвы / Ф.Д. Микайылов // сборник трудов межд. конф. "16 Зимняя школа по механике сплошных сред"- Пермь, 2009.

93. Микайылов Ф.Д. Определение параметров модели солепереноса при промывках водонасыщенных поверхностно засоленных почвогрунтов / Ф.Д. Микайылов // Почвоведение 2007- № 5. С. 599-609.

94. Микайылов Ф.Д., Шеин Е.В. Моделирование и прогноз температурного режима почвы / Ф.Д. Микайылов, Е.В. Шеин // Тез. докл. I Всерос. научно-практ. конф. с межд. участием "Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути к инновациям". - М., 2008. - с. 38-45.

95. Мильшин А.А. Разработка основ спутникового метода определения влажности почв лесных экосистем с использованием СВЧ-

радиометрии L- И P- диапазона [Текст] / А.А. Мильшин, В.П. Саворский, А.Г. Гранков, С.П. Головачев, В.А. Плющев / Отчет о НИР/НИОКР. Институт радиотехники и электроники РАН (Фрязинское отделение). – 1998.

96. Михайлова Н.В. Прогрессивные способы возделывания облепихи на юге Западной Сибири: Барнаул. – Азбука, 2005. – 168 с.

97. Мурадов Р.А. О моделировании динамики влажности в системе «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ-ВОДА» [Текст] / Р.А. Мурадов// Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2013. – С. 117-123.

98. Назаров Л.Е. Нейросетевые алгоритмы оценки влажности почвы по данным СВЧ-радиометрических измерений [Текст] / Назаров Л.Е., Чухланцев А.А., Шутко А.М. // Исследование Земли из космоса. 2004. – С. 21-29.

99. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почв [Текст] / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский. - М.: Наука, 1967 - с. 650.

100. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение – почва – воздух [Текст] / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский - Л.: Гидрометеиздат, 1975 - с. 359.

101. Нерпин, С.В. Использование численных методов расчета на ЭВМ водного режима почв в исследованиях по программированию урожаев: методические рекомендации/ С.В. Нерпин, М.Я. Кузнецов, Г.А. Трубачева, Е.Д. Хлопотенков - Л: АФИ, 1981. – 70 с.

102. Николаева С.А. Разработка теории устойчивости почв степной зоны в условиях орошения [Текст] / С.А. Николаева, И.В. Блынская, Е.А. Вознесенская, С.О. Рождественская, С.Ю. Розов //Отчет о НИР/НИОКР. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова (МГУ Ф-т почвоведения) – 1995.

103. Ничипорович, А.А. О путях повышения производительности фотосинтеза растений / А.А. Ничипорович - М.: Изд. АН СССР, 1963. - С. 5 - 37.

104. Ничипорович, А.А. Фотосинтез и вопросы интенсификации сельского хозяйства/ А.А. Ничипорович - М.: Изд. Наука, 1965. – 48 с.

105. Нурабаев Д.М. Обоснование технологии и режима микроорошения садов на крутосклонных землях Ферганской долины: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: 1992. – С. 57-65.

106. Овчинников, А.С. Ресурсосберегающая технология капельного орошения сладкого перца / А.С. Овчинников, О.В. Данилко, М.М. Гавра // Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии и техника в орошаемом земледелии: сбор. науч. докладов междунар. науч.- практ. конф. Колмна: ФГНУ ФГНУ ВНИИ «Радуга», 2004. – С. 89-90.

107. Орлова И.В. Проблемы развития ирригации в Алтайском крае и вопросы ее экологической безопасности [Текст] / И.В. Орлова // Ползуновский вестник, 2011 - №4-2. – С. 93-97.

108. Панина С.С. Математические модели влагопереноса в почве: значение экспериментального обеспечения и верхних граничных условий [Текст] / С.С. Панина, Е.В. Шеин // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение 2014 - №3 С.45-50.

109. Панкова Т.А. К вопросу изучения динамики влагозапасов темно-каштановой почвы саратовского Заволжья [Текст] / Т.А. Панкова // Научная жизнь 2014 – №1 С. 19-22.

110. Панкова Т.А. Результаты моделирования нормирования орошения сельскохозяйственных культур для условий Саратовского Заволжья [Текст] /Т.А. Панкова // Научное обозрение 2014 - №1 С. 17-20.

111. Панфилов В.П. Агрофизическая характеристика почв западной Сибири / В.П. Панфилов. – Новосибирск: Наука СО, 1976. – 544с.

112. Панфилов В.П. Почвенно-физические условия мелиорации в Западной Сибири. – Новосибирск: Наука СО, 1977. – 88с.

113. Панфилов В.П. Агромелиоративные аспекты гидротермического режима почв юга Западной Сибири / В.П. Панфилов // Почвенный криогенез и мелиорация мерзлотных и холодных почв: мат. всесоюз. конф. (Москва, 28-31 окт 1975 г.). – М.: Наука, 1975. – С. 39-42.

114. Панфилов В.П. Теплофизические свойства и режимы черноземов Приобья / В.П. Панфилов, С.В. Макарычев, А.И. Лунин и др. – Новосибирск. Наука, 1981. – 118 с.
115. Пачепский Я.А. Общие вопросы математического моделирования в физической химии почв [Текст] / Я.А. Пачепский // Математические модели физико-химических процессов в почвах 1990 – с. 5-15.
116. Плюснин И.И., Голованов А.И. Мелиоративное почвоведение. М.: Колос, 1983.
117. Плюснин, И.И. Мелиоративное почвоведение / И.И. Плюснин. – М.: Гос. изд-во с.-х. лит-ры, 1960. – 421 с.
118. Погорелов А.В. Моделирование поля влажности почвы на территории Краснодарского края с использованием спутниковых снимков. / А.В. Погорелов, Е.Н. Киселев // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2009. – С. 39-43.
119. Поздеев А.Г. Информационно-технологическая модель «Осадки-Сток» [Текст] / А.Г. Поздеев, Ю.А. Кузнецова // Труды Поволжского государственного технологического университета 2013 – С.439-440.
120. Полуэктов Р.А. Оперативный расчет и прогноз динамики почвенной влаги [Текст] / Р.А. Полуэктов, И.В. Опарина, В.В. Терлеев // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации 2003 – С. 241-244.
121. Попович Ф.К. Сравнительная оценка различных способов полива и исследование режимов орошения плодового питомника в условиях Молдавии: дисс. на соиск. уч. степ. канд. с.-х. наук. Кишинев. 1983. - С. 23-89.
122. Почвы Алтайского края. - М.: АН СССР, 1959. – 392 с.
123. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Рождественская Т.А., Балыкин С.Н. Сравнительный анализ основной гидрофизической характеристики степных и горно-лесных почв Алтая, восстановленной расчетными методами // Вестник АГАУ. – 2014 г. – № 12. – С. 29-35.

124. Пучкин И.А. Сорты груши для промышленных и потребительских садов Алтайского края / И.А. Пучкин // Материалы научно-практической конференции. – Барнаул, 2003. – С.161-165.
125. Расчет энергии водоудерживающей способности почвы через почвенно-гидрологические константы // Вестник АГАУ, 2014. – № 11. – С. 34-36.
126. Ревут И.Б. Физика в земледелии / И.Б. Ревут. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. – 400 с.
127. Ревут И.Б. Физика почв / И.Б. Ревут. – 2-е изд. доп. и перераб. – Л.: Колос, 1972. – 368 с.
128. Резюме Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – Информационный бюллетень, № 49, 2014 г., С. 7-10.  
<http://www.meteorf.ru/upload/iblock/9be/izmenenie-klimata-n49-augsep-2014.pdf>
129. Роде А.А. Основные учения о почвенной влаге. Т. 1. Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 663 с.
130. Ромко А.В. Создание интегрированной модели агрогеоценоза на мелиорированных землях // Материалы международной конференции «Наукоемкие технологии в мелиорации», М.: 2005. – С.385-389.
131. Росс, Ю.К. Математическое моделирование фотосинтетической продуктивности растений / Ю.К. Росс // Вестник АН СССР, 12. - 1972. – С. 99 - 104.
132. Русин И.Н. Оценка в реальном времени потока тепла в почву по данным почвенных термометров [Текст] / И.Н. Русин, Е.А. Куканова // Научный диалог 2012 - №7 С. 98-112.
133. Рыбалко О.Б. Режим орошения плодоносящего сада яблони в условиях Волго-Ахтубинской поймы: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. с.-х. наук. Волгоград. – 1999. – 22 с.



134. Рычѳва Т.А. Моделирование температурного режима дерново-подзолистой почвы: определяющая роль условий на поверхности [Текст] / Т.А. Рычѳва // Почвоведение 1999 - № 6. С. 697-703.
135. Симанкин А.Ф. Обоснование математической модели процессов влагообмена почвогрунтов [Текст] / А.Ф. Симанкин, Ф.А. Симанкин, Е.Н. Макаревич // Горный информационно-аналитический бюллетень 2013 - №S4 (1) С. 490-496.
136. Смагин А. Теория и методы оценки физического состояния почв / Почвоведение. – 2003. – № 3. – С. 328–341.
137. Смагин А.В. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования / А.В Смагин, Н.Б. Садовникова, Маауиа Бен-Али Мизури // Почвоведение 1998 - №11, С. 1362-1370.
138. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Хайдапова Д.Д., Шевченко Е.М. Экологическая оценка биофизического состояния почв. М.:МГУ, 1999. 48с.
139. Старцев А.И. Модель динамики температур и влажности почвы в имитационной модели роста деревьев дуба черешчатого [Текст] / А.И. Старцев// Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. – С. 275-277.
140. Стрельцов Ф.Ф. Режим орошения черной смородины при поливе дождеванием в лесостепной зоне Алтайского края: автореф. дис. канд. с.-х. наук / Ф.Ф. Стрельцов. М., 1974. 24 с.
141. Стрельцов Ф.Ф. Совершенствование конструкции автоматизированных систем орошения в теплицах и повышение техники безопасности при работе с ними / Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 5 (55), 2009
142. Судницын И.И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 255 с.

143. Сызганов В.С. Иммитационное моделирование снежного покрова [Текст] / В.С. Сызганов, М.Н. Фаворская // Актуальные проблемы авиации и космонавтики 2011 – Том 1 №7 С. 372-373.
144. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. – М.:Гриф и К, 2007. – 616 с.
145. Тиньгаев А.В. Моделирование режима орошения сточными водами многолетних трав с использованием информационной технологии [Текст] / А.В. Тиньгаев, А.С. Давыдов, Р.П. Воробьева, В.Б. Шепталов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета 2012 - №10 С. 46-49.
146. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнение математической физики [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский - М.: Наука, 1966 - с.724.
147. Узунян В.А. Рациональные способы полива плодовых насаждений в условиях Араратской равнины и предгорной зоны Армянской ССР: диссертация на соискание ученой степени кандидата с.-х. наук. Ереван. 1974. – С. 58-73.
148. Устенко, Г.П. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах как основа формирования высоких урожаев / Г.П. Устенко // Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 37-70.
149. Файбищенко Б.А. Водно-солевой режим грунтов при орошении [Текст] / Б.А. Файбищенко - М.: Агропромиздат, 1986 – с. 304.
150. Флюорцэ И.С. Расчет водопотребления и режима орошения плодовых культур для почвенно- климатических условий Молдавии: диссертация на соискание ученой степени кандидата с.-х. наук. Новочеркасск, 1971. – С. 57-98.
151. Хабаров С.Н. Агроэкосистемы садов юга Западной Сибири / РАСХН. СО НИИСС им. М.А. Лисавенко. Новосибирск, 1999. – 308 с.
152. Хабаров С.Н. Почвозащитные мероприятия в садах Западной Сибири. М.: Росагропромиздат, 1991. – 190 с.

153. Харламов В.И. Пути повышения экономической эффективности садоводства в Алтайском крае: дис. канд. экон. наук / В.И. Харламов. Целиноград, 1973. 161 с.
154. Харламова Н.Ф. Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук, Барнаул – 2012
155. Хворова Л.А. Математические модели в теории и практике точного земледелия [Текст] / Л.А. Хворова // Известия Алтайского государственного университета 2011 №1-2. 121-125.
156. Хворова Л.А. Расчет глубины промерзания почвы в модели прогноза перезимовки озимых культур в условиях Алтайского края [Текст] / Л.А. Хворова, О.А. Иванова, М.Н. Стрижев // Известия Алтайского государственного университета 2009 - №1 С. 66-68
157. Хворова Л.А. Численное моделирование составляющих теплового режима почв Алтайского Приобья [Текст] / Л.А. Хворова, А.В. Жариков // Известия Алтайского государственного университета 2013 – Том 2 № 1 С. 126-130.
158. Хоржан О.К. Водопотребление и способы полива интенсивных яблоневых садов в Приднестровье Молдавии: диссертация на соискание ученой степени кандидата с.-х. наук. Новочеркасск, 1985. – С. 53-76.
159. Черенкова Е.А. Возможности использования спутниковых данных влажности почвы при анализе урожайности яровой пшеницы (на примере Саратовской области) [Текст] / Е.А. Черенкова, А.А. Черенкова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2013 – Том 10 С. 267-273.
160. Чигир В.Г. Цикличность гидротермического режима почв и прогноз урожаев сельскохозяйственных культур / В.Г. Чигир, О.Н. Губина // Почвенный криогенез и мелиорация мерзлотных и холодных почв: материалы всесоюзной конференции (28-31 октября 1975 г.). – М.: Наука, 1975. – С. 174-176.

162. Чудновский, А.Ф. Теплофизика почв / А.Ф. Чудновский. - М., 1976. – 352 с.
163. Чудновский А.Ф. Основы агрофизики / А.Ф. Чудновский. – М., 1959. – Ч. III. – 634 с.
164. Чудновский А.Ф. Прибор для одновременного определения коэффициентов тепло - и температуропроводности и объемной теплоемкости почвогрунтов в естественных условиях / А.Ф. Чудновский // Тр. ГГО. – 1947. - Вып. 2 (64). – С. 42.
165. Чудновский, А.Ф. Физика теплообменов в почве [Текст] / А.Ф. Чудновский. - М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 220 с.
166. Чудновский, А.Ф. Цилиндрический зонд для измерения термических характеристик почвы [Текст] / А.Ф. Чудновский // Сборник по агрофизике. – Л., 1952. - Вып. 5. – С. 86 – 90.
167. Шабанов В.В. Биоклиматическое обоснование мелиораций. М.: Гидрометеиздат, 1973. – 126с.
168. Шабанов В.В. Количественные методы обоснования необходимости и эффективности управления факторами жизни растений при комплексных мелиорациях: автореферат дис. ... доктора технических наук: Московский гидромелиоративный институт, 1992. – 41 с.
169. Шабанов В.В., Орлов И.С. Оценка природно-хозяйственного риска в условиях изменения климата. М.: TEMPUS - SWARP - ICT 21051, 2003. – 218с.
170. Шеин Е.В. Курс физики почв / Е.В. Шеин- М.: МГУ, 2005 – 432 с.
171. Шеин Е.В. Математические модели некоторых почвенных характеристик: обоснование, анализ, особенности использования параметров моделей / Е.В. Шеин, А.М. Русанов, Е.Ю. Милановский, Д.Д. Хайдапова, Е.И. Николаева // Почвоведение 2013 – №5 С. 595.
172. Шеин Е.В. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв / Е.В. Шеин, Т.А. Архангельская, В.М. Гончаров, А.К. Губер и др. - М.: МГУ, 2001. – 200 с.

173. Шеин Е.В., Архангельская Т.А. Педотрансферные функции: состояние, проблемы, перспективы // Почвоведение, 2006. – №10. – С. 1205-1217.
174. Шеин Е.В., Архангельская Т.А. Педотрансферные функции: состояние, проблемы, перспективы / Е.В. Шеин, Т.А. Архангельская // Почвоведение, 2006. – №10. – С. 1205-1217.
175. Шеин Е.В., Гончаров В.М. Агрофизика [Текст] / Е.В. Шеин, В.М. Гончаров - Ростов-на-Дону: Феникс, 2006 – с. 400.
176. Шолохов Л.В. Режим орошения яблони в условиях Кабардино-Балкарской АССР: диссертация на соискание ученой степени кандидата с.-х. наук. Новочеркасск, 1963. – С. 69-74.
177. Шульгин А.М. Климат почв и его регулирование / А.М. Шульгин. – Л.: Гидрометеиздат, 2-е изд.: 1972. – 341 с.
178. Шульгин А.М. Почвенно-климатические зоны и районы Алтайского края / А.М. Шульгин // Труды Алтайского СХИ. – Барнаул, 1948. – Вып. 1. – С. 12-18.
179. Шульгин А.М. Температурный режим почв / А.М. Шульгин. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 298 с.
180. Шумаков Б.Б. Интенсификация использования водных ресурсов в орошаемом земледелии / Б.Б. Шумаков // Вестник сельскохозяйственной науки. - 1983. - № 10. – С. 109 - 116.
181. Arya L.M., Paris J.F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. SSSAJ, 1981. – V.45. – P.1023-1030.
182. Branduk T., Skapski K., Szatyłowisz J. Alluvial soil moisture modeling in a drainage irrigation system // Ann. Warsaw Agr. Univ. –SGGW Land Reclam, 1994. – № 27. – P.3-13.
183. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper. Civil Engineering Dep., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, 1964. – № 3. – 27 p.

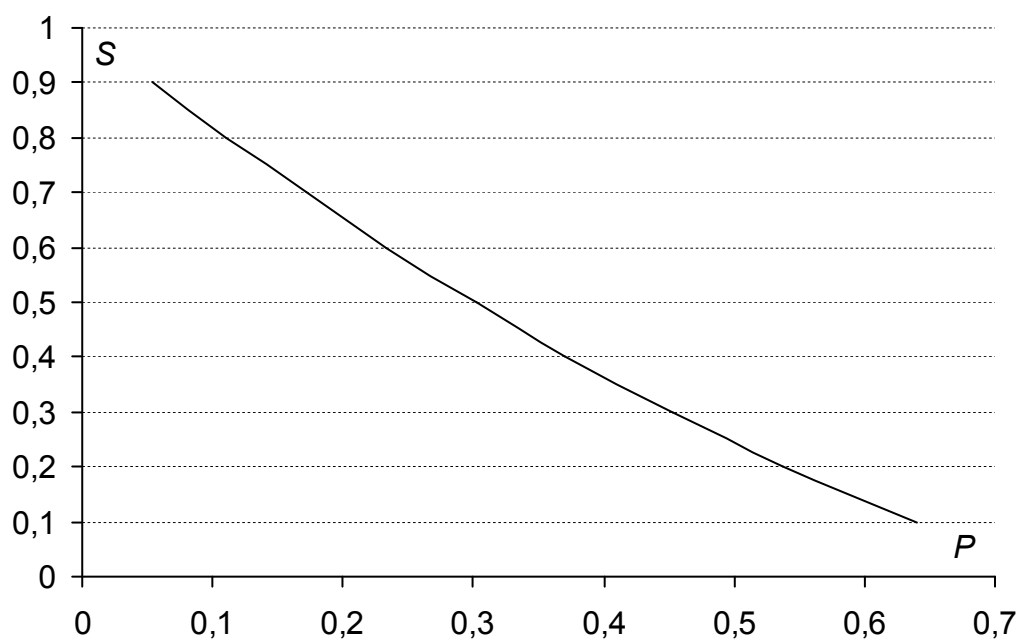
184. E+Soil MCT-sensor / <https://en.eijkelkamp.com/products/sensors-monitoring/e-soil-mct.html>
185. Grundmann G. L., Renault P., Rosso L., Bardin R. Differential effects of soil water content and temperature on nitrification and aeration // Soil Sci. Soc. Am. J., 1995. – Vol. 59. – P.1342-1349.
186. Hanks R.J., Ashcroft G.L. Applied soil physics. Soil water and temperature application. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg, 1980. – 151 p.
187. Horton R. Jr. Determination and use of soil thermal properties near the soil surface / R. Horton Jr. New Mexico: State University, 1982. – 151 p.
188. Jensen M.E., R.D. Burman and R.G. Allen. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE manuals and reports on engineering practice. ASCE, New York, 1990. – 332 p.
189. Juri W.A., Gardner W.R., Gardner W.H. Soil Physics / W.A. Juri, W.R. Gardner, W.H. Gardner, New York, 1991. – 328 p.
190. Keen B.A. The physical properties of the soil / B.A. Keen. Longmans, Green and Co. London. New-York. Toronto, 1931. – 264p.
191. Kersten M.S. Thermal properties of soils / M.S. Kersten // Minneapolis, 1949. – 227p.
192. Kersten M.S. Thermal properties of soils. Engineering experiments station bull / M.S. Kersten // Minneapolis, 1948. – №28. – P.32-39
193. Kirham D., Powers W.L. Advanced soil physics / D. Kirham, W.L. Powers. New York. John Wiley and Sons, 1972. – 342 p.
194. Kroes J.G., Van Dam J.C. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Wageningen. Alterra, Green World Research, 2003. – 211p.
195. Leon L.F. MapWindow Interface for SWAT (MWSWAT).PDF, v. 2.3, 2014 [Электронный ресурс] / L.F. Leon. – 93 p. – Режим доступа: <http://waterbase.org./documents.html>.
196. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media / Y. Mualem. Water Resource, 1976. – №12. – 513-522p.

197. Neitsch S. L. / Soil and Water Assessment Tool. Input/Output Documentation. Version 2012: Technical report: № 439 [Электронный ресурс] / Texas Water Resources Institute. – 2012. – 650 p. – S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry [и др.]. – Режим доступа: <http://swatmodel.tamu.edu/>.
198. Neitsch S. L. / Soil and water assessment tool. Theoretical documentation. Version 2005 / S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams. – 2005. – 494 p.
199. Neitsch S. L. / Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009 [Электронный ресурс] / S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams; Texas Agricultural Experiment Station. – 2011. – 647 p. – Режим доступа: <http://swatmodel.tamu.edu/>.
200. Nielson C.B., Groffman P.M., Hamburg S.P., Driscoll Ch. T., Fahey T.J., Hardy J.P. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils // Soil Sci. Soc. Am. J., 2001. – Vol. 65. – P.1723-1730.
201. Parikh P.J. Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media / P.J. Parikh, J.A. Havens, H.D. Scott // Ibid, 1979. – V.43. – P.1050-1052.
202. Rosney P., de Polcher J., Bruen M., Laval K. Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large scale land surface processes // Geophys. Res., 2002. – P.107-112.
203. Scanlon D., More T. Carbon dioxide production from peatland soil profiles: the influence of temperature, oxic/anoxic conditions and substrate // Soil Sci. February 2000. Vol. 165(2). P. 153-160.
204. Schaap M.G. Accuracy and uncertainty in PTF predictions // Pachepsky Ya., Rawls W.J. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Elsevier, 2004. – P.33-43.
205. Sepaskhan, A.R. Thermal conductivity of soil as function of temperature and water content / A.R. Sepaskhan, L. Boersma // Amer. Geophys. Union Trans., 1957. V.38. – P.222-231.

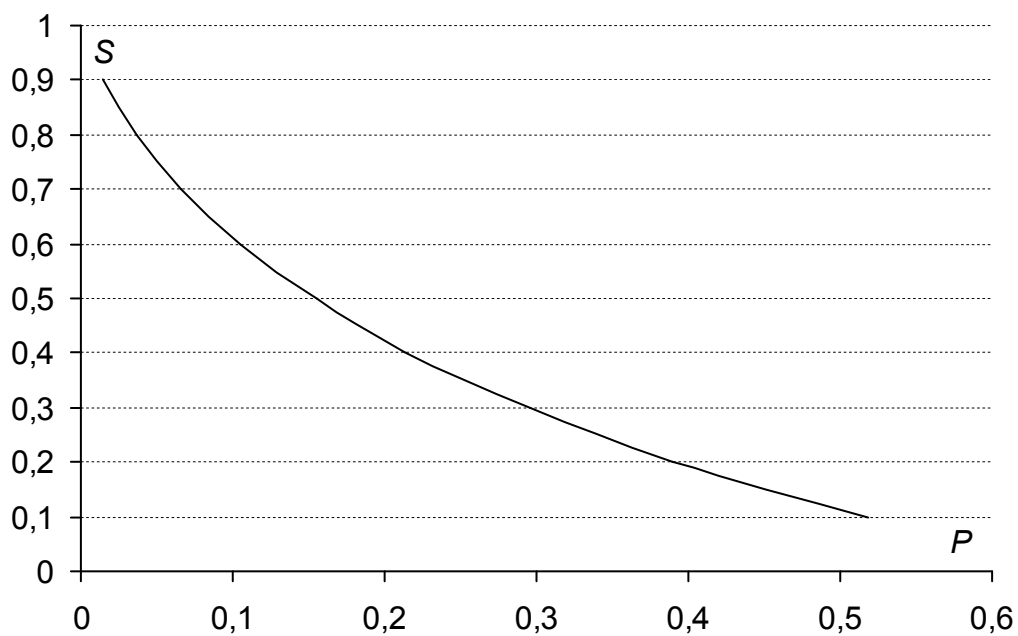
206. Simunek J., van Genuchten M.Th., Jacques D., Schaap M. and Mattson E.D. Recent Development in the Hydrus Software: Overland Flow and Biogeochemical Modules, 2004. – 519p.
207. van Dam J.C. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. Doctoral Thesis Wageningen University, 2000. – 312p.
208. van Genuchten M.Th. A Closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils / M.Th. van Genuchten // Soil Sci. Soc. Am. J., 1980. – Vol.44. – P.892-898.
209. van Genuchten M. Th., Leij F.J., Yates S.R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA, US Salinity Laboratory, Riverside, CA, 1991. – 52p.
210. Weber J.B., Caldwell A.C. Soil and plant potassium as affected by soil temperature under controlled environment // Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 28. – 1964. – P.661-667.
211. Wierenga, P.J. Thermal properties of soil based upon field and laboratory measurements / P.J. Wierenga, D.R. Nelsen, R.M. Hagan // Ibid., 1969. – V.33. – P.354-360.
212. Wosten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Bas C. Le. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Final report on the European Union Funded project. Wageningen, Staring Centre, 1998. – Report №156, DLO. – 106p.



## ПРИЛОЖЕНИЯ



Вероятность превышения заданного уровня продуктивности яблони



Вероятность превышения заданного уровня продуктивности груши

Изменение средней продуктивности плодовых культур при изменении температуры и влажности почвы.

	0,5t	0,6t	0,7t	0,8t	0,9t	t	1,1t	1,2t	1,3t	1,4t	1,5t
0,5W	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,6W	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
0,7W	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
0,8W	0,12	0,15	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16
0,9W	0,14	0,20	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,22
W	0,16	0,24	0,29	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,27
1,2W	0,17	0,29	0,40	0,46	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,44	0,36
1,4W	0,18	0,31	0,46	0,58	0,64	0,66	0,66	0,66	0,63	0,54	0,40
1,6W	0,18	0,31	0,47	0,64	0,75	0,80	0,81	0,79	0,73	0,59	0,41
1,8W	0,18	0,31	0,48	0,65	0,80	0,89	0,91	0,87	0,77	0,60	0,41
2,0W	0,18	0,31	0,48	0,65	0,81	0,91	0,93	0,89	0,77	0,60	0,41

Изменения средней урожайности плодовых культур при изменении температуры и влажности почвы, ц/га.

	0,5t	0,6t	0,7t	0,8t	0,9t	t	1,1t	1,2t	1,3t	1,4t	1,5t
0,5W	6,3	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
0,6W	7,6	8,2	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,3
0,7W	10,9	12,8	13,3	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,1
0,8W	14,5	18,5	20,0	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,2	19,4
0,9W	17,3	24,1	27,4	28,2	28,3	28,4	28,4	28,4	28,3	28,0	26,2
W	19,2	28,9	35,0	37,1	37,4	37,5	37,5	37,5	37,4	36,5	32,8
1,2W	20,8	34,9	48,0	55,4	57,7	58,0	58,1	58,0	57,2	53,2	43,0
1,4W	21,1	36,9	54,9	69,5	76,9	79,0	79,2	78,7	75,4	65,3	47,9
1,6W	21,2	37,2	56,9	76,4	90,1	96,1	97,3	95,2	87,1	70,6	49,2
1,8W	21,2	37,2	57,3	78,3	96,0	106,5	109,2	104,8	92,0	72,0	49,4
2,0W	21,2	37,2	57,3	78,5	97,0	108,6	111,7	106,8	92,9	72,2	49,4