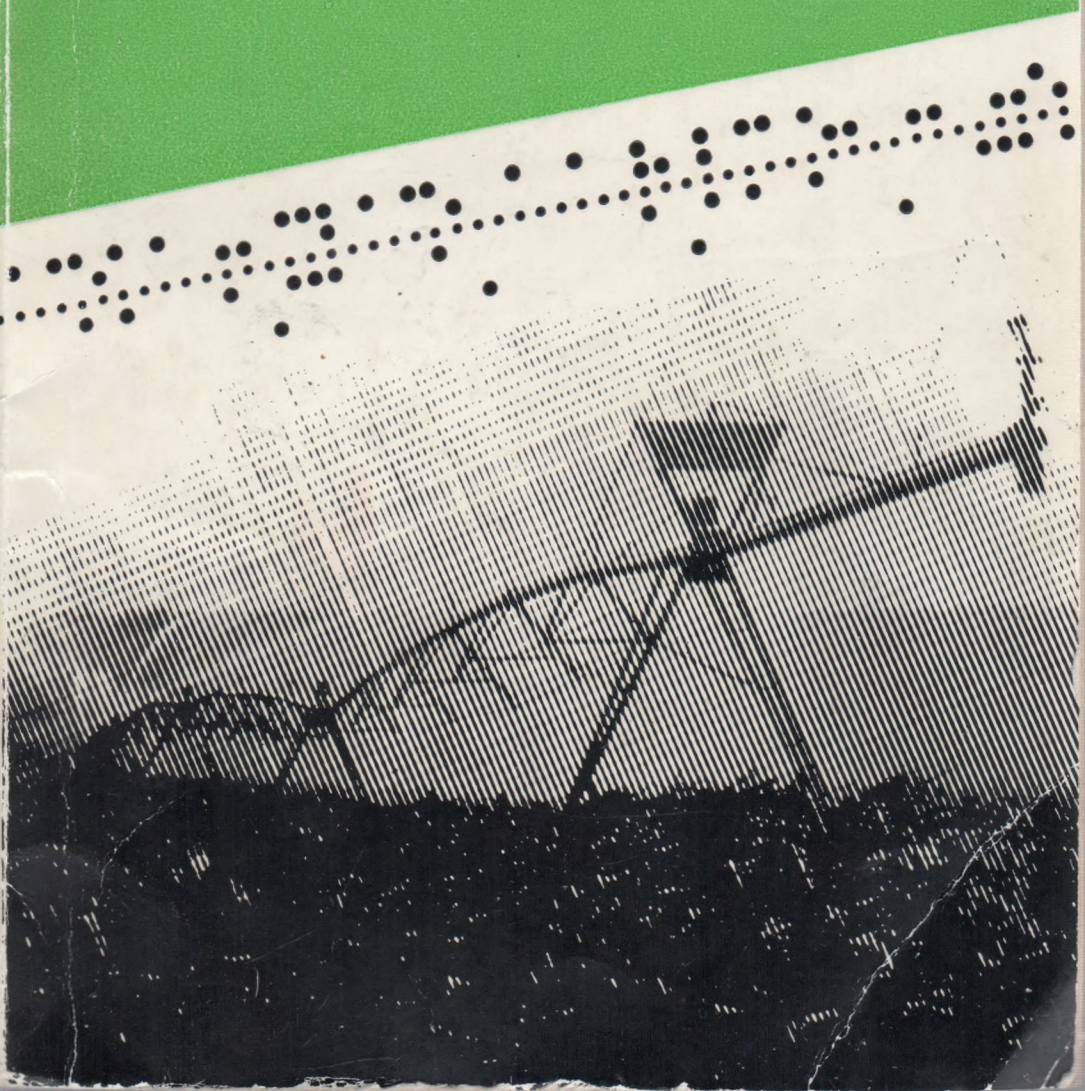


В. В. Шабанов

**ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ
ЯРОВОЙ
ПШЕНИЦЫ
И ЕЕ РАСЧЕТ**



В. В. Шабанов

**ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ
ЯРОВОЙ
ПШЕНИЦЫ
И ЕЕ РАСЧЕТ**



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1981

Рецензент
д-р техн. наук С. И. Харченко
Ответственный редактор
акад. ВАСХНИЛ Б. Б. Шумаков

Рассматриваются методы расчета влагообеспеченности яровой пшеницы на основании математических моделей «растение—среда» и стохастических моделей формирования влагозапасов в расчетном слое.

Практическое применение метода расчета показано на примере некоторых районов Западной Сибири и Зауралья.

Предназначена для специалистов в области мелиорации, водного хозяйства, агрометеорологов и гидрологов.

The book by V. V. Shabanov "Soil Moisture Regime Calculation for Spring Wheat" considers the methods for soil moisture regime calculations on the basis of mathematical models of "plant—environment" and stochastic models of soil moisture formation in the calculated layer. Practical application of calculational methods is shown on the example of the Urals and Western Siberia.

The book is meant for specialists in reclamation, water resources and agrometeorology.

ОТ РЕДАКТОРА

Настоящая монография является логическим продолжением и развитием предыдущей работы автора «Биоклиматическое обоснование мелиораций» (Гидрометеоиздат, 1973 г.) и в то же время представляет самостоятельный интерес. Она посвящена вопросам развития стохастических методов расчета режима орошения сельскохозяйственных культур. Однако постановка задачи (главы 1 и 2) значительно шире, что открывает возможности анализа в дальнейшем всех основных факторов жизни растений при орошении и комплексном мелиорировании.

В первых двух главах излагается не только система задач, но приводятся и оригинальные теоретические модели процессов взаимодействия растения с внешней средой и закономерностей формирования условий внешней среды.

В последующих главах автор довольно подробно описывает методику использования разработанных им моделей в практических расчетах. Наибольший интерес представляют зависимости относительного урожая растения от влажности (продуктивных влагозапасов) почвы, что дает возможность проследить изменение оптимальных траекторий влажности во времени. Анализ этих закономерностей приводит к выводу, что в некоторые годы поддержание постоянных (по современным понятиям) оптимальных влагозапасов не только приводит к бесполезному расходованию оросительной, воды, но и влечет за собой неизбежное снижение урожая. Закономерности, полученные В. В. Шабановым (рис. 11—14), позволяют определить и потери урожая при отклонении значения фактора от оптимальной траектории. Потери же эти весьма существенны в отдельные декады даже при незначительном (на 10—15%) отклонении влажности от оптимума. Это еще раз подтверждает неоднократно высказываемую нами мысль, что точность регулирования фактора в пространстве и во времени должна быть значительно выше, чем в настоящее время, даже на самых совершенных производственных оросительных системах.

Представляется, что результаты, полученные в главе 3, будут интересны проектировщикам, экономистам, работникам службы эксплуатации и разработчикам систем автоматизации мелиоративных систем.

В заключительной главе автор описывает новый метод расчета режима орошения, основанный на довольно детальной информации о требованиях растений и стохастических моделях формирования условий внешней среды. Несмотря на относительную простоту моделей, получаются интересные результаты, позволяющие найти функциональную зависимость относительной продуктивности сельскохозяйственной культуры от оросительной нормы.

Разработанная автором методология и полученные теоретические модели процессов взаимодействия растений с внешней средой и закономерностей формирования урожаев являются теоретическим фундаментом для создания гидромелиоративных систем комплексного регулирования основных факторов жизни растений. Изложенный в работе новый метод расчета режима орошения имеет ряд существенных преимуществ перед общепринятыми и должен найти широкое применение при обосновании развития крупномасштабных мелиораций в условиях все возрастающего дефицита водных ресурсов. Кроме того, данный метод должен найти широкое применение при проектировании оросительных систем, а также может быть использован службой эксплуатации в целях оперативного водораспределения в соответствии с ходом развития сельскохозяйственных культур и складывающимися конкретными гидрометеорологическими условиями каждого года. Таким образом, монография В. В. Шабанова представляет большой научно-теоретический, методический и практический интерес.

Академик ВАСХНИЛ Б. Б. Шумаков

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая работа является результатом многолетнего сотрудничества автора с коллективами институтов Союзводпроект и Союзгипроводхоза в рамках проблемы перераспределения водных ресурсов в Западной Сибири и Средней Азии.

Одним из центральных вопросов переброски стока в Среднюю Азию стал вопрос об обосновании необходимости и эффективности мелиораций в зоне каналов и водоводов трасс переброски. Основная трудность заключается в том, что во многих районах Северного Казахстана, Зауралья и Западной Сибири запросы на обскую воду значительно превышают возможности ее распределения по пути переброски. В то же время названные районы являются основными в нашей стране производителями яровой пшеницы, и отдельные исследования показывают, что орошение яровой пшеницы во многих районах по трассе переброски может значительно повысить и стабилизировать урожаи.

Исследования и расчеты, выполненные за последние десять лет по рассматриваемой зоне, среди которых следует отметить работы В. С. Мезенцева (Омский сельскохозяйственный институт), С. И. Харченко (Государственный гидрологический институт), В. И. Егорова, К. П. Арента (Московский гидромелиоративный институт) и ряда других ученых, показали, что орошение здесь необходимо почти повсеместно и средние многолетние оросительные нормы колеблются от 1000 м³/га на севере зоны до 3000 м³/га на юге. Однако дефицит водных ресурсов и недостаточность экспериментального материала по режимам орошения и его влияния на физиологию пшеницы поставили ряд частных задач. Одной из таких задач явилось распределение ограниченной оросительной нормы во время вегетации таким образом, чтобы потери урожая при этом не превышали 10-15%.

В представленной работе рассмотрен один из возможных подходов к решению такой задачи и обсужден ряд вопросов, связанных с устойчивостью урожаев, получаемых на сортоиспытательных станциях этой зоны. Показана связь урожаев на сортоиспытательных станциях с урожаями хозяйств ряда административных районов и приведены примеры расчетов экономных оросительных норм, позволяющих при значительном сокращении водоподачи лишь незначительно уменьшить урожаи.

Выполнение этой работы потребовало огромного количества исходных материалов, которые были собраны и систематизированы Н. А. Байбаевой, некоторые расчеты и проработки были сделаны совместно с В. А. Калашниковым, значительное влияние при постановке задачи и обсуждении результатов оказал руководитель проектных и научно-исследовательских работ, связанных с проблемами перераспределения стока рек

по территории СССР, И. А. Герарди. Этим товарищам и сотрудникам Проблемной лаборатории МГМИ С. А. Богацкой, С. П. Денисову, Ю. М. Землянову, Т. А. Ореховой, Н. С. Романенко, А. С. Чаяновой, Н. Е. Чаяновой, без помощи которых завершение работы было бы затруднено, автор искренне благодарен.

Одновременно хотелось бы выразить признательность рецензенту рукописи д-ру техн. наук С. И. Харченко за ряд полезных замечаний и пожеланий.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость проведения настоящей работы возникла в связи с решением ряда задач при разработке научных основ комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР и переброской сибирских рек в бассейн Аральского моря.

Можно полагать, что даже после осуществления переброски значительных количеств воды в южные районы страны в большинстве этих районов вода останется фактором, ограничивающим развитие производительных сил и, в частности, сельского хозяйства. Поэтому вопросы экономии воды и увеличения выхода сельскохозяйственной продукции на кубометр поданной на поле воды при разработке указанных проблем ставятся наиболее остро.

Существующие данные о требованиях различных растений к водному режиму не позволяют дифференцированно рассчитывать режим подачи воды в различные фазы вегетации с большой точностью. Расчеты ведутся для широкого диапазона требований растений, в связи с чем в большинстве фаз вегетации не создается оптимального водного режима, несмотря на значительные затраты поливной воды. Такое же положение наблюдается и на осушаемых землях для объемов отводимой воды.

Установление более точных оптимальных диапазонов регулирования, позволяющих полнее реализовывать потенциальные возможности растения, приводит в ряде случаев не только к экономии воды, но и к существенному повышению урожая. Последнее обстоятельство наиболее важно, так как позволит при заданном объеме сельскохозяйственной продукции сократить посевные площади и, следовательно, также приведет к экономии воды.

Кроме того, существующие данные о требованиях растений не позволяют оценить возможное снижение урожая при создании неоптимального водного режима для растений. Это обстоятельство затрудняет технико-экономические расчеты при поиске оптимального варианта мелиоративной системы.

При расчете возможных урожаев и оптимальных режимов увлажнения необходимо учитывать многолетние колебания уровня фотосинтетически активной радиации (ФАР), которая связана не только с деятельностью солнца, но и с метеорологической обстановкой года в конкретном пункте. При низких уровнях ФАР, видимо, нецелесообразно делать дополнительные затраты и подавать большие количества воды в надежде на высокие урожаи. В этом случае лимитирующим фактором будет радиация, что часто наблюдается в зоне избыточного и неустойчивого увлажнения.

Указанное выше приводит к выводу, что для эффективного использования и экономии воды необходимо более точно рассчитывать диапазоны требований растений к водному и

радиационному режиму и, зная прогнозы влагозапасов в почве с учетом возможных потерь урожая в данный период вегетации при неоптимальных условиях, определять стратегию мелиоративного регулирования.

Для решения поставленных задач было необходимо разработать систему математических моделей, включающую математические модели требований растений, модели формирования режима влажности, модели обоснования необходимости проведения оросительных мелиораций и, наконец, использовать метод расчета дефицитов влагозапасов.

В работе сделана попытка создать систему таких моделей для растений в виде дифференциальных уравнений изменения продуктивности в зависимости от условий среды, позволяющих синтезировать информацию за каждый момент вегетации, описать изменение вероятностей влагозапасов во времени и дать прогноз влагозапасов для расчета величины водоподачи. Эта система моделей дополняется моделями обоснования необходимости мелиораций и позволяет решить вопрос о водообеспеченности сельскохозяйственной культуры, понимая под этим комплекс: требования растений — условия внешней среды — искусственное восполнение дефицитов воды. При этом в работе не рассматриваются вопросы обеспеченности водоисточника (река, водохранилище, канал), так как это является большой самостоятельной задачей, решение которой может быть осуществлено с привлечением настоящих разработок.

Идентификация моделей была проведена на основе материалов по климату, природным условиям и урожаям в районах намечаемой трассы канала переброски (Казахстан, Зауралье, Оренбургская область и ряд других районов).

В связи с небольшим объемом работы подробно описаны лишь основные положения и методика расчетов, которые при необходимости поясняются на конкретных примерах. Учитывая большой интерес к вопросам требований растений и, в частности, к количественным показателям относительной продуктивности в зависимости от влагозапасов, в работе приводятся графики, позволяющие в первом приближении определять оптимальную влажность в различных радиационных условиях и относительную продуктивность при отклонении влажности от оптимального значения.

Предлагаемые методы и результаты расчетов могут быть использованы при определении направленности мелиорации в зависимости от метеорологических условий и при уточнении оросительных норм яровой пшеницы на проектных стадиях составления схемы мелиорации и технико-экономического обоснования ее эффективности.

Глава 1

ТРЕБОВАНИЯ РАСТЕНИЙ К УСЛОВИЯМ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

1.1. Некоторые основные принципы и законы биологии, необходимые для расчета требований растений

Как известно, сельскохозяйственная мелиорация является системой мероприятий, приводящих условия внешней среды в соответствие с требованиями растений, поэтому для расчета обеспеченности растения водой, теплом и пищей необходимо знать эти требования к важнейшим факторам внешней среды и в первую очередь к водному фактору.

Однако для построения системы регулирования этого далеко не достаточно. Необходимо уметь количественно оценить динамику накопления урожая, влияние на этот процесс неоптимальных краткосрочных воздействий внешней среды, изменение требований растений в процессе развития и роста, влияние одного фактора внешней среды на требования растений к другому и решить еще целый ряд подобных задач.

Основным подходом к решению этих задач является функциональный подход, т. е. рассмотрение организма растения как единого целого. Математическое описание его можно составить, зная потоки вещества и энергии, поступающие в растение, и соответствующее увеличение биомассы. Структурный подход, который можно трактовать как систему математических моделей, описывающих процессы на уровне элементарной структурной единицы, по крайней мере на уровне живой клетки, может оказаться менее плодотворным.

В самом деле, «если, используя достаточно развитую математическую теорию клетки, основанную, скажем, на молекулярной динамике, мы смогли бы разработать теорию физических сил, действующих между клетками, и исходя из такой теории вычислить формы многоклеточных организмов, мы имели бы нечто вроде проблемы N тел с величиной N порядка 10^{13} и с неконсервативными силами впридачу. Попытки в этом направлении действительно делались, но все, на что здесь можно надеяться,— это получение каких-то выводов весьма общего характера». Эти слова Н. Рашевского [5], сказанные им в отношении формы живого организма, можно отнести и к другим характеристикам. В связи с этим игнорирование функционального подхода, т. е. рассмотрение организма как системы со сложной внутренней структурой, строение которой

можно определить, изучая его реакции на изменения условий внешней среды, на данном этапе непропорционально. Структурный подход аналогичен методам анализа «черного» или «серого» ящиков в кибернетике и отличается тем, что гипотеза о структуре объекта, его математическая модель формируется на основе феноменологического анализа происходящих процессов, а метод сигнал—отклик используется как инструмент для идентификации модели.

Прежде чем подробно рассмотреть задачи, возникающие здесь, и возможные методы их решения, проанализируем некоторые принципы и законы биологии, на основании которых можно осуществить решение поставленных задач.

По Н. Рашевскому [5], в биологии сформулированы следующие принципы.

I. Принцип соответствия. Конструкция организма соответствует внешней среде.

II. Принцип максимальной простоты. Для устойчивых организмов конструкция его является простейшей для выполнения данных функций.

III. Принцип оптимальности. Конструкция органа оптимальная по затратам материала на его построение и энергии его работы.

IV. Принцип адекватности изменения. Конструкция организма изменяется адекватно со средой.

V. Принцип биологического эпиморфизма. Свойства различных организмов могут рассматриваться как взаимно-однозначные отображения, т. е. множеству свойств одного организма могут быть поставлены в соответствие свойства другого. При этом основные соотношения, характеризующие организм как целое, сохраняются.

Опираясь на эти принципы, можно наметить некоторые основные черты математических моделей растения.

I. Принцип соответствия организма среде, сформировавшей его, позволяет предполагать, что условия внешней среды в месте происхождения данного растения являются оптимальными. Таким образом, для первоначального вида (сорта) требования к условиям внешней среды могут быть выявлены при изучении условий среды места происхождения. Дальнейшая генетическая деформация сорта происходила в каких-то определенных условиях и для генетически устойчивых новых сортов требования его могут быть определены на основании анализа факторов внешней среды нового места происхождения. Для сортов генетически неустойчивых может произойти восстановление требований к условиям внешней среды, которые были у далеких предков. Исходя из сказанного, основным методом для получения цифрового материала по требованиям растений к условиям внешней среды (обозначаем эту величину через S_{ϕ})

будет изучение многолетних режимов факторов ϕ в месте происхождения сорта.

II. Принцип простейшей конструкции подразумевает, что одна и та же функция организма может быть выполнена различными по конструкции органами, но в организмах, прошедших естественный отбор, эти функции выполняются простейшими по конструкции органами. Несомненно, что при этом подразумевается необходимость ненарушения других функций. Из этого принципа следует, что организм может быть описан множеством математических моделей, но лишь простейшая из адекватных моделей является истинной.

III. Принцип оптимальности затрат вещества на построение органа и затрат энергии на его работу дает возможность полагать, что существует некоторая величина внешних условий (количество вещества и энергии, поступающих из внешней среды), при которой функция требований S_{ϕ} растений имеет максимум.

IV. Принцип адекватности изменения важен при рассмотрении организмов, свойства которых были сформированы в среде, отличной от среды обитания предков, т. е. новых сортов. В этом случае оптимальными будут условия места происхождения нового сорта. Это положение широко используется при районировании сортов, когда их размещают в районах с условиями, возможно близкими к их требованиям. Основываясь на принципах I и IV, можно полагать, что организмы, формирующиеся в одном месте обитания, имеют близкие требования к условиям внешней среды и могут быть описаны близкими моделями.

Принцип V наиболее важен для построения математической модели организма, так как он дает возможность использовать математический подход к описанию сходства между организмами. По Н. Рашевскому, «каждому организму соответствует некоторый топологический комплекс или топологическое пространство. Высшим организмам соответствуют комплексы или пространства более сложной структуры. Топологические комплексы или пространства, соответствующие различным организмам, получают друг из друга при помощи универсального правила геометрического преобразования и могут быть отображены друг на друга много-однозначным способом с сохранением некоторых основных соотношений» [5].

По всей вероятности, если мы имеем дело с организмами одной эволюционной ступени, то преобразования будут взаимно-однозначными.

Таким образом, основываясь на принципе V, можно полагать, что преобразование, приводящее функции требований разных растений к одному виду, будет единым для всех растений и всех факторов внешней среды. Задача теперь заключается в том, чтобы найти такое преобразование. Кроме того, если

преобразование координат фазового пространства факторов окажется линейным для всего множества факторов и организмов, то можно считать, что требования растений к условиям внешней среды подчиняются одному закону. Следовательно, найдя такое универсальное геометрическое преобразование, можно применить его к имеющемуся опытному материалу и непосредственно проверить правильность высказанных выше предположений.

1.2. Требования к моделям и основные экспериментальные факты для построения моделей

В п. 1.1 были приведены соображения о некоторых принципиальных свойствах математических моделей, описывающих требования растений к условиям внешней среды.

Рассмотрим более подробно этот вопрос, развивая сказанное. Во-первых, рассмотрим требования, которым должны отвечать математические модели. Таковыми являются: 1) внутренняя непротиворечивость модели, 2) полнота, 3) логическая простота построения, 4) возможность построения вычислительного алгоритма, 5) возможность экспериментальной проверки модели.

Первое требование заключается в том, что в основе модели (теории) нет других противоречащих друг другу положений. Например, известно, что для растения все факторы равнозначны и ни один из них не может быть заменен другим. С другой стороны, существуют данные экспериментов, из которых выясняется, что увеличение фосфорного питания растения сказывается на водном режиме, т. е. растение легче переносит недостаток влаги. Если эти положения вводить в модель в таком виде, возникает противоречие, поэтому должны быть найдены новые факты и механизмы, которые позволили бы объяснить эти явления в условиях одной модели.

Второе требование — полнота модели — обусловлено необходимостью объяснения всех известных проявлений данного явления.

Третье требование — логическая простота модели — вытекает непосредственно из принципа II Рашевского и сводится к тому, что из множества возможных моделей, отвечающих всем требованиям, выбираем наиболее простую.

Четвертое и пятое требования в определенной степени связаны между собой и обязывают нас составлять модель на языке, который может быть просто реализован в виде вычислительного алгоритма, лишь при выполнении этого требования возможна экспериментальная проверка модели. Однако и в этом случае следует иметь в виду, что экспериментальная проверка

однозначно осуществляется при использовании в модели признаков, которые могут быть непосредственно измерены.

Рассмотрим теперь основные этапы, по которым осуществляется разработка математических моделей. Коротко это можно представить в следующем виде:

- 1) постановка задачи и формулировка конечных целей исследований,
- 2) формализованное описание процесса,
- 3) разработка алгоритма модели,
- 4) выбор критериев оценки результатов моделирования,
- 5) составление программы расчета модели, или аналитическое решение,
- 6) отладка программы на ЭВМ и ее уточнение,
- 7) оценка точности и надежности моделирования,
- 8) использование модели для обобщения известных экспериментов и предсказание новых свойств и черт явления.

Все основные законы процесса моделирования, рассмотренные выше, свойственны не только моделям требований растений, но вообще широкому классу природных явлений. Поэтому эти положения могут быть использованы для построения моделей других явлений. Теперь рассмотрим основные экспериментальные факты, известные из физиологии растений, которые должна включать будущая модель.

Для нормального роста растений важны все факторы внешней среды, которые присутствовали в процессе эволюционного создания данного растения. Очевидно, что для культурных сельскохозяйственных растений таковыми являются солнечная радиация, минеральное и газовое питание, водный и тепловой режимы, космическое излучение, магнитные поля, присутствие в почве физиологически активных веществ и другие факторы.

Влияние неоптимальных условий в различные периоды вегетации зависит от длительности этого промежутка и величины отклонения от оптимального уровня. Даже кратковременные неоптимальные воздействия большой амплитуды могут привести к умиранию растения (заморозки, суховеи и т. д.). При воздействии ряда неоптимальных факторов наилучшее действие на накопление будущего урожая окажет фактор, абсолютная величина отклонения которого будет максимальна. Существует возможность некоторой компенсации неоптимальных условий по одному фактору посредством химических или других воздействий, что связано с влиянием на некоторые физиологические механизмы, временно компенсирующие неоптимальные условия. Вполне возможно, что подобные компенсации не являются нормой.

Широко известен также факт изменения необходимых для растения потоков вещества и энергии в процессе онтогенеза. Более того, известно, что интегральный расход массы фактора графически изображается S-образной кривой.

В связи с этим хотелось бы заметить, что эта закономерность не распространяется на уровень потенциала фактора (температура, влажность, концентрация и т. д.), т. е. того потенциала, под действием которого осуществляется поступление в растение соответствующей субстанции фактора.

Все сказанное выше рассматривалось с точки зрения взаимодействия растения и внешней среды. Однако конечной целью мелиорации является увеличение биологической продуктивности культурных сельскохозяйственных растений. В связи с этим возникает необходимость построения математической модели накопления биомассы, и в частности урожая, модели более общей, включающей модель требований растений как составную часть.

Обсудим основные положения, которые помогут осветить процессы накопления биомассы. Урожай в первом приближении можно рассматривать как функцию наследственной информации, которая полностью реализуется при оптимальных условиях внешней среды. Однако урожай культурного растения зависит и от конкурентов, т. е. сорняков и микроорганизмов, потребляющих минеральные соли и воду из почвы. Значительное отрицательное влияние на урожай может оказать болезнь растений и сельскохозяйственные вредители. С другой стороны, следует иметь в виду, что культурное растение произошло из дикого, которое воспитывалось в определенной экологической системе — такой, в которой существует не только конкурентная борьба, но и явление симбиоза, поэтому, возможно, существуют некоторые виды растений, которые при совместном выращивании могут оказать благоприятное влияние на урожай культурных растений и значительно повысить общую биологическую продуктивность.

1.3. Постановка задач и формулирование целей исследований требований растений

С учетом изложенного выше формулируем основные задачи, подходы и методы их решения. Определим необходимые исходные данные и ожидаемые результаты по первой группе моделей. По-видимому, перечень перечисленных ниже задач не является исчерпывающим, однако можно полагать, что основные вопросы нашли в нем отражение.

В целях компактности представим это в виде табл. 1. Здесь задачи расположены таким образом, что сначала рассматривается общая задача (имеет однозначный номер), а необходимые для ее решения частные задачи (имеющие двузначный номер), которые записаны в ней как исходные данные, следуют за этой общей задачей.

Таблица 1

Система задач изучения требований растений к условиям внешней среды

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>I.1. Построить детерминированную математическую модель накопления биомассы (урожая) в зависимости от сорта, внешних условий среды и т. д. $U = U [U_{\text{max}}, \Phi]$</p>	<p>Подход функциональный; методы решения теоретико-экспериментальные (составление системы дифференциальных и алгебраических уравнений, коэффициенты которых находятся экспериментально). Проверка модели осуществляется на основе данных комплексного опыта в искусственных (фитотрон) или естественных условиях (поле).</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Закономерности и эксперименты по изучению зависимости прироста урожая от факторов внешней среды для различных сортов. 2. Модель потерь урожая в зависимости от степени неоптимальности условий. 3. Модель требований растений к условиям внешней среды. 4. Зависимость требований растений от возраста. 5. Модель энерго- и массообмена в системе растение—среда. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность прогноза урожая по прогнозируемым или измеренным значениям факторов внешней среды. 2. Определение необходимых воздействий по всем факторам для минимизации потерь. 3. Возможность расчета допустимого времени неоптимальности по l-факторам для получения заданного урожая.
<p>I.1.1. Обобщить экспериментальные данные о зависимости прироста урожая (продуктивности) от внешней среды.</p>	<p>Методы решения теоретические — нахождение линейного преобразования фазового пространства факторов, позволяющего обобщить множество экспериментальных данных.</p>	<p>Экспериментальные материалы по различным культурам и факторам среды.</p>	<p>Обобщенные данные позволяют выявить качественный характер закономерностей, связывающих растение и среду.</p>
<p>I.1.2. Построить математическую модель потерь урожая в зависимости от степени неоптимальности условий. $\Delta U = \Phi [1 - S]$</p>	<p>Подход функциональный; методы решения теоретические. Составление дифференциального уравнения потерь урожая от l-фактора; коэффициенты потерь определяются экспериментально. Проверка модели осуществляется совместно с моделью I (задача I.1).</p>	<p>Требования растений к l-фактору внешней среды.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность использования в задаче I.1. 2. Определение фактора, дающего max потерь (min фактор) для первоочередного воздействия.

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>1.1.3. Модель требований растений к условиям внешней среды $S = S(\varphi)$</p>	<p>Подход функциональный или структурно-функциональный; методы решения экспериментально-теоретические. Составление теоретической модели в виде системы дифференциальных уравнений, связывающих относительную продуктивность в t-тый момент времени с условиями внешней среды.</p>	<p>1. Значение минимума, оптимума и максимума I-ного фактора 2. Условия внешней среды. 3. Показатель оптимальности. 4. Зависимость оптимальных значений фактора от возраста растения</p>	<p>1. Возможность использования в задаче 1.2. 2. Определение диапазона регулирования (квазиоптимального) для данного растения.</p>
<p>1.1.4. Определение зависимостей изменения абсолютного значения оптимума как функции возраста растения для: а) потенциала фактора, б) потока фактора.</p>	<p>а. Подход структурный; методы теоретические. На основании анализа продукционных процессов установить, меняются ли условия оптимального протекания биохимических реакций с возрастом растений, б. Подход функциональный; методы экспериментально-теоретические. На основании анализа экспериментальных данных об интенсивности накопления тех или иных веществ и изменения потоков растворов через растение в процессе роста и развития устанавливается зависимость изменения потоков во времени.</p>	<p>1. Данные о проходящих через растение потоках вещества и энергии как функции времени. 2. Данные о проводимости системы растение—среда для каждого фактора.</p>	<p>1. Решение задачи позволит выяснить, изменяются ли требования растений к потенциалу факторов (влажности, температуре, концентрации и т. д.). 2. Определение закономерностей изменения потока I-ного фактора во время жизни растения. 3. Возможность расчета необходимой плотности искусственно создаваемого потока I-ного фактора.</p>

Примечание к задаче 1.1.4б. Следует отметить, что потоки и потенциалы связаны через проводимость (сопротивление) системы. Поэтому если проводимость во времени изменяется пропорционально потокам, то потенциал фактора остается постоянным.

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
1.1.5. Модель энерго- и массообмена растения и среды.	Подход структурно-функциональный; методы решения теоретические. Составляется система дифференциальных уравнений, описывающих процессы энерго- и массообмена системы растение—среда, в которых учитываются расходы энергии и вещества на биохимические процессы обмена для саморегулирования (охлажденные растения и т. д.).	а. Экспериментальные данные о накоплении и передвижении энергии и вещества в отдельных элементах растений. б. Проводимость системы растение—среда, среда—растение.	1. Решение задачи позволит прогнозировать накопление биомассы (урожая) по измеренным потокам вещества и энергии. Результаты должны совпасть с полученными в задаче 1.1. 2. Создавая определенные потоки вещества и энергии, согласующиеся с пропускной способностью каналов обмена, можно управлять величинами урожая. 3. Возможность оценки шах величин урожая.
1.2. Составить стохастический вариант задач 1.1, 1.1.2, 1.1.3: а) стохастический вариант задачи 1.1;	В модель 1.1 вводятся случайные на множестве растений величины $\xi(U \max)$ и $\xi(\Delta U)$.	Законы распределения $\xi(U \max)$, $\xi(\varphi_{\text{opt}})$.	Получение закона распределения урожая в зависимости от генетических возможностей сорта. Расчет (прогноз) урожая заданной обеспеченности.
б) стохастический вариант задачи 1.1.2;	В модель 1.1.2 вводится случайная на множестве растений величина $\xi(S)$.	Закон распределения.	Получение закона распределения потерь урожая как случайной величины от 5 для использования в задаче 1.2а.
в) стохастический вариант задачи 1.1.3.	В модель 1.1.3 вводится случайная на множестве растений величина $\xi(\varphi_{\text{opt}})$.	Закон распределения $\xi(\varphi_{\text{opt}})$.	Получение закона распределения требований растений к условиям среды как случайной величины от S_{opt} . Используется в задаче 1.2б.
1.2.1. Исследование случайных величин $\xi(U \max)$; $\xi(\varphi_{\text{opt}})$; $\xi(S)$; $\xi(\varphi_{\text{opt}})$.	Методы теории вероятности и случайных функций.	Законы распределения аргументов функции $\xi(S)$.	Использование результатов для решения задачи 1.2.

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>1.3. Составить стохастическую модель накопления биомассы (урожая) с учетом случайных величин условий по полю.</p>	<p>В модель 1.3 вводится случайная величина $\xi_{xy}(\varphi)$. Далее определяется случайная величина $\xi_{xy}(S_i)$, затем $\xi_{xy}(\Delta U_i)$, которая является входом в модель 1.1.</p>	<p>Законы распределения $U_{\max}, \Delta U, \Delta I, S_{\text{опт}}$.</p>	<p>Получение закона распределения урожая в зависимости от закона распределения условий внешней среды по полю.</p>
<p>1.4. Построить количественную классификацию растений по их требованиям к условиям внешней среды.</p>	<p>Используя методы теории распознавания образов, формализуется поставленная задача и определяются однородные классы растений с близкими (согласно выбранному критерию) требованиями к условиям внешней среды $\text{Кл}(S_i)$ по i-факторам.</p>	<p>Требования растений по 1-факторам S_{ik}.</p>	<p>Растения, принадлежащие к одному классу, выращиваемые в одних природных условиях, требуют одинаковых мелиоративных воздействий. С учетом этих требований класс $\text{Кл}(S_i)$ можно рассматривать как систему севооборотов для одной мелиоративной системы. При этом система будет наиболее экономична с точки зрения регулирующих устройств.</p>
<p>1.5. Поиск минимального числа измеряемых параметров, адекватно характеризующих продуктивность (состояние растения) в зависимости от внешних условий.</p>	<p>Обобщение литературного материала, специальные лабораторные исследования в фитотроне.</p>	<p>Методы и приборы для измерения параметров продуктивности растения.</p>	<p>Получение измеряемых параметров, характеризующих продуктивность в каждый момент онтогенеза, по которым можно оценить степень оптимальности внешних условий.</p>
<p>1.6. Разработка методов и приборов для измерения показателей продуктивности растений.</p>	<p>Эксперимент с растениями в искусственных (фитотрон) и естественных условиях (поле).</p>		<p>Создание системы измерителей, позволяющих осуществлять контроль и оптимизацию показателей продуктивности растения.</p>

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
1.7. Уточнение математических моделей продуктивности растения и введение в качестве исходных величин минимального числа измеримых показателей состояния растения.		Исходные математические модели и параметры продуктивности.	Создание оптимизирующей аналоговой системы, на вход которой подаются параметры продуктивности и условия внешней среды.

Примечание. U и U_{\max} — урожай; ϕ — безразмерная величина t -ного фактора внешней среды; ΔU — потери урожая при неоптимальных условиях; S — безразмерная величина продуктивности (относительная продуктивность $S = U/U_{\max}$, или степень оптимальности); ξ — случайная функция.

Анализируя табл. 1, приходим к известной схеме, по которой существуют старые и новые задачи, старые и новые методы их решения. Естественно, что из четырех возможных комбинаций выбираются только три следующие; решение старых задач новыми методами, решение новых задач старыми и новыми методами.

Относительно задач, перечисленных в табл. 1, можно сказать, что в большинстве своем они относятся к задачам теоретической биологии. В связи с этим следует иметь в виду распространяющееся мнение о том, что формальный язык современной математики принципиально не может выразить все тонкости биологических процессов и что необходим новый математический аппарат, сконструированный специально для этого.

Однако несомненно, что выбор любого математического аппарата в первую очередь должен быть обусловлен не только сущностью процесса, но и той степенью приближения к истине, которая на данном этапе развития науки возможна.

Как видно из табл. 1, задачи, поставленные там, тесно связаны друг с другом, и поэтому нельзя приступать к решению более общих задач, не зная решения частных. Кроме того, как отмечалось, перечисленные задачи не исчерпывают проблемы взаимоотношений растения и внешней среды, а лишь первично приближаются к ней.

В настоящее время существенных результатов в решении тех или иных задач добились в нашей стране группа эстонских биогеофизиков — Ю. К. Росс [6], Х. Г. Тооминг [9], К. А. Молдау [4], А. Лайск [3] и др.; сотрудники Института экспериментальной метеорологии — О. Д. Сиротенко, Ю.А. Хва-

ленский [7, 10] и др.; сотрудники отдела комплексных мелиораций ВНИИГиМ под руководством Е. П. Галямина [2] и ряд других ученых. Подробные обзоры решенных задач можно найти в монографиях [6, 9].

Следует отметить, что подходы, развиваемые этой группой ученых, весьма перспективны, но для решения конкретных задач, особенно на стадии проектов мелиоративных систем, пока не могут быть использованы из-за значительного объема исходной информации, необходимой для идентификации моделей.

Поэтому наряду с указанным подходом, который более тяготеет к структурному, развиваются и функциональные подходы, не описывающие всей сложности происходящих процессов внутри объекта, но позволяющие правильно установить реакцию растения на изменения условий внешней среды.

1.4. Некоторые однофакторные модели для фиксированных моментов времени

Выше рассматривались теоретические принципы и задачи исследований по первой группе моделей — исследование требований растений к условиям внешней среды.

В настоящем параграфе будут рассмотрены некоторые из возможных однофакторных моделей в предположении, что остальные факторы зафиксированы на определенном уровне и требования растений описываются в t -тый момент онтогенеза.

Возможность такого подхода основана в первую очередь на пятом принципе Рашевского, суть которого для данного случая допустимо интерпретировать как возможность некоторого линейного преобразования многофакторных зависимостей продуктивности — внешняя среда в однофакторные. Поэтому здесь полагаем, что на каком бы значении фактора ни была взята частная кривая требований растений $S(\varphi_i)$ при фиксации остальных факторов внешней среды $\varphi = 2, 3, \dots, \text{const}$, линейное преобразование всех частных кривых и наложение их друг на друга приведет к обобщенной четко выраженной кривой с допустимым разбросом экспериментальных точек.

В то же время можно предположить, что вид зависимости, т. е. функциональный механизм, остается постоянным в онтогенезе, так как смена принципа (закона) функционирования привела бы к существенному усложнению организационно-управляющей генетической программы, и такой организм в процессе естественного отбора был бы отсеян.

Таким образом, задачу описания требований растений к условиям среды можно свести к построению однофакторных

моделей для l -того момента времени и в последующем включить их в многофакторные модели как составные части.

Прежде чем составить задачу описания требований к l -ному фактору внешней среды в i -тый момент вегетации, введем обозначения:

$S = U/U_{\max}$ — степень оптимальности условий среды (относительная продуктивность растения) по фактору φ , где U — текущая продуктивность сельскохозяйственной культуры, U_{\max} — максимальная продуктивность сельскохозяйственной культуры при оптимальном значении фактора.

Формулировка задачи вытекает из анализа закономерностей жизнедеятельности растений, который дает возможность предположить, что изменение урожая при изменении фактора внешней среды dU/φ пропорционально степени оптимальности S и отклонению значения фактора от оптимального значения ($\varphi_{\text{opt}} - \varphi$).

В самом деле, чем больше степень оптимальности S , тем больше dU/φ , т. е. малое отклонение от оптимальных условий приводит к значительному (по сравнению с малым S) отклонению (падению) от U_{\max} . В то же время чем больше условия отклоняются от оптимальных, т. е. чем больше величина ($\varphi_{\text{opt}} - \varphi$), тем более чувствительно растение к улучшению условий; с другой стороны, при оптимальных условиях ($\varphi_{\text{opt}} - \varphi = 0$, $dU/\varphi = 0$, т. е. существует некоторая точка U_{\max}). При $\varphi = \varphi_{\text{opt}} - \varphi$

Учитывая сказанное выше, уравнение связи U с φ можно записать для l -того момента вегетации в виде

$$dU/d\varphi = kS(\varphi_{\text{opt}} - \varphi). \quad (1.1)$$

Так как

$$U = U_{\max}S,$$

то получим

$$U_{\max} dS/d\varphi = kS(\varphi_{\text{opt}} - \varphi), \quad (1.2)$$

где k — коэффициент пропорциональности, приводящий в соответствие размерности правой и левой частей и характеризующий возможность саморегулирования растения в неоптимальных условиях.

Интегрируя, получим

$$U_{\max} \ln S = k\varphi_{\text{opt}}\varphi - \frac{k}{2}\varphi^2 + C \quad (1.3)$$

или

$$\ln S = -\frac{k}{2U_{\max}}\varphi^2 + \frac{k\varphi_{\text{opt}}}{U_{\max}}\varphi + \frac{C}{U_{\max}}. \quad (1.4)$$

Определим C из условия $S=1$ при $\varphi = \varphi_{\text{opt}}$:

$$\frac{k}{2U_{\text{max}}} \varphi_{\text{opt}}^2 - \frac{k\varphi_{\text{opt}}^2}{U_{\text{max}}} - \frac{C}{U_{\text{max}}} = 0$$

или

$$C = -k\varphi_{\text{opt}}^2/2.$$

С учетом этого получим

$$\ln S = -\frac{k}{2U_{\text{max}}} \varphi^2 + \frac{k\varphi_{\text{opt}}}{U_{\text{max}}} \varphi + \frac{k\varphi_{\text{opt}}^2}{2U_{\text{max}}}. \quad (1.5)$$

Обозначим

$$\frac{k}{2U_{\text{max}}} = A; \quad \frac{k\varphi_{\text{opt}}}{U_{\text{max}}} = B; \quad \frac{k\varphi_{\text{opt}}^2}{2U_{\text{max}}} = D.$$

Тогда

$$S = \exp(-A\varphi^2 + B\varphi + D). \quad (1.6)$$

Если начало координат по φ перенести в точку $\varphi = \varphi_{\text{opt}}$, т. е. за начало отсчета принять $\varphi_{\text{opt}} = 0$, то получим $B = \varphi_{\text{opt}}/U_{\text{max}} = 0$ и $D = k\varphi_{\text{opt}}^2/2U_{\text{max}} = 0$.

Тогда

$$S = \exp\left(-\frac{k}{2U_{\text{max}}} \varphi^2\right). \quad (1.6a)$$

Размерность $k = \left[\frac{U}{\varphi^2}\right]$.

Очевидно, что недостатком этой модели является нарушение «физичности» в областях экстремальных условий, т. е. при $\varphi \gg \varphi_{\text{opt}}$ или $\varphi \ll \varphi_{\text{opt}}$, $S \neq 0$. Однако этого можно избежать, введя в уравнение (1.2) условия, определяющие поведение $S(\varphi)$ при $\varphi_{\text{opt}} \ll \varphi \ll \varphi_{\text{opt}}$. Другим недостатком этой модели является то, что она дает симметричные зависимости $S(\varphi)$. Это обстоятельство в значительной мере смягчается тем, что параметры модели и, в частности, φ_{opt} меняются во время вегетации. Однако и этого можно избежать, записав уравнение (1.2) в виде

$$\frac{dS}{d\varphi} = \frac{k(\varphi_{\text{opt}} - \varphi)S}{(\varphi + \alpha_1)(\varphi - \alpha_2)}, \quad (1.7)$$

где α_1 и α_2 — функции от минимального $\varphi_{\text{тщ}}$ и максимального φ_{max} значения фактора, или в виде

$$\frac{dS}{d\varphi} = \frac{kS(\varphi - \varphi_{\text{opt}})}{\varphi^2 + (\varphi_{\text{min}} - \varphi_{\text{max}})\varphi - \varphi_{\text{min}}\varphi_{\text{max}}}. \quad (1.7a)$$

Решение уравнения (1.7) при $\varphi_{\min} = 0$ и $\varphi_{\max} = 1$ записывается в виде

$$S = \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\text{opt}}} \right)^{\gamma_{\text{opt}}} \left(\frac{\varphi_{\max} - \varphi}{\varphi_{\max} - \varphi_{\text{opt}}} \right)^{\gamma} (\varphi_{\max} - \varphi_{\text{opt}}).$$

Размерность $\gamma = \left[\frac{1}{\varphi} \right]$. Эта величина характеризует, степень саморегулирования растений в i -тый момент вегетации — $\Delta\varphi_{\text{opt}}$.

Таким образом, мы получили зависимость относительной продуктивности S от безразмерной величины любого фактора в i -тый момент вегетации. На основании этих данных можно построить зависимость $S(\varphi; \tau)$, т. е. изменение во время вегетации относительной продуктивности при различных условиях внешней среды и фиксированном уровне солнечной радиации.

1.5. Модели осреднения требований растений к условиям среды за вегетационный период

В целях проверки и сравнения зависимостей $S(\varphi; \tau)$ при разном уровне радиации рассчитаем среднюю за период вегетации величину степени оптимальности по воде $\bar{S}(\omega)$ для различных уровней влажности, постоянных во время вегетации ($\omega^* = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$). Такие расчеты можно проводить по различным формулам, например:

$$\bar{S}(\omega) = U_i / U_{\max}(R), \quad (1.9)$$

где U_i — урожай в конкретный год; $U_{\max}(R)$ — максимальный урожай, который может быть получен при оптимальных условиях увлажнения и минерального питания и при той сумме фотосинтетически активной радиации (ФАР), которая поступила к растению в конкретный год; $\bar{S}(\omega)$ — осредненный за вегетацию показатель степени оптимальности по водному режиму.

Приближенно можно считать, что

$$U_{\max}(R) = (R_{\text{ФАР}} - R_0) / \alpha, \quad (1.10)$$

где $R_{\text{ФАР}}$ — фотосинтетически активная радиация (ккал/(см² × сезон)); R_0 — средняя многолетняя ФАР, при которой урожай данной сельскохозяйственной культуры равен нулю; α — количество ФАР, необходимое для производства 0,1 т/га зерна яровой пшеницы.

Кроме этого, расчет $\bar{S}(\omega)$ можно осуществить другими способами. Так, например,

$$\bar{S}(\omega) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\omega), \quad (1.11)$$

где $S_i(\omega)$ — степень оптимальности водного режима в i -тый момент времени; n — число учетных моментов (пятидневка, декада).

Или

$$\bar{S}(\omega) = \sum \eta_i S_i(\omega), \quad (1.12)$$

где η_i — вклад данного момента в конечный урожай; или

$$\bar{S}(\omega) = \wedge (\vee S_i), \quad (1.13)$$

где \wedge — оператор логического умножения; \vee — оператор логического сложения.

Расчеты по формуле (1.11) дают неточные значения в области малых степеней оптимальности. И хотя формула (1.12) обладает теми же недостатками (эти формулы неприменимы в случае, когда условия внешней среды приводят к гибели растения), все же расчет по формуле (1.12) дает более правильные результаты.

В теоретическом плане формула (1.13) должна показывать действительное состояние, в котором находилось растение во время вегетации по данному фактору, так как при $S_i = 0$ для любой фазы $\bar{S}(\omega) = 0$, т. е. непрохождение одной из фаз развития приводит к нулевому урожаю. Однако для использования этой формулы необходима информация не только о вкладе каждого момента времени в конечный урожай, но и о взаимовлияниях этих моментов друг на друга. К сожалению, в современных исследованиях таких данных пока нет.

Для выполнения расчетов по формуле (1.12) необходимо иметь величины коэффициентов η , которые можно трактовать как долевой вклад в создание урожая в i -тый момент времени при оптимальных условиях. С другой стороны, это потери урожая при неоптимальных условиях. Естественно, что $\sum \eta_i = 1$. т. е. при полностью оптимальных условиях во время вегетации ($S_i = 1$) относительный урожай \bar{S} будет равен 100 %.

Получить такие коэффициенты можно либо на основании данных специальных опытов, в которых в различные периоды вегетации создаются неоптимальные условия и вычисляется связанное с этими условиями падение урожая [8], либо теоретически.

Для перехода от однофакторных зависимостей $S_i(\varphi)$ к многофакторным $S_i^{(L)}(\varphi)$, где L — число факторов, можно провести суммирование действия всех факторов при условии действия в каждый момент вегетации лишь «минимального» (определяющего) фактора, тогда

$$S^{(L)}(\varphi) = \sum S_i(\varphi) q(l), \quad (1.14)$$

где

$$q(l) = \begin{cases} 1 & \text{при } \varphi_l = \min, \\ 0 & \text{при } \varphi_l \neq \min. \end{cases} \quad (1.15)$$

С учетом (1.14) многофакторная зависимость требований растений к условиям внешней среды за весь вегетационный период запишется в виде

$$\bar{S}^{(L)}(\varphi) = \sum_{i=1}^n \eta_i S^{(L_i)}(\varphi). \quad (1.16)$$

Для определения потерь продуктивности $\Delta\bar{S}^{(L)}$ за счет временных неоптимальных условий выражение (1.16) можно записать в виде

$$\Delta\bar{S}^{(L)} = 1 - \bar{S}^{(L)}(\varphi). \quad (1.16a)$$

Представленные модели являются одним из возможных вариантов описания продуктивности сельскохозяйственных растений в зависимости от условий внешней среды. Они могут быть использованы также и при оценке, действия различных факторов на фотосинтез [9].

Таким образом, в задаче 1.1 (табл. 1) «Построить детерминированную модель накопления биомассы в зависимости от сорта, внешних условий и т. д. $U = U[U_{max}, \varphi]$ » решена подзадача 1.1.1 — «Обобщить экспериментальные данные о зависимости прироста урожая (продуктивности) от внешней среды». На основании большого экспериментального материала [11] было установлено, что для различных растений и различных факторов внешней среды (водного, пищевого, теплового) зависимость продуктивности (относительного урожая) S от условий среды φ имеет вид (1.6).

Подзадача 1.1.2 — «Построить математическую модель потерь урожая в зависимости от неоптимальности внешних условий» может быть решена на основе подзадачи 1.1.3, которая записывается в виде (1.8), и уравнений синтеза продуктивности за отдельные моменты вегетации в средневегетационную продуктивность, которые в общем виде (для многих факторов) записываются как (1.16a).

В задаче (1.8) численно решается подзадача 1.1.4 — «Определить изменение оптимальной величины фактора во времени $\varphi_{opt}(t)$ ».

Задача 1.1.5, как уже указывалось, решается в работах Росса, Тооминга, Молдау, Лайска, Сиротенко, Хваленского, Галямина и других. Можно полагать, что при идентификации моделей задачи 1.1.5 не по всему посеву, а по ограниченному количеству растений необходимо составлять стохастические варианты задачи 1.1 и, получив решение для ограниченной выборки, распространить его на всю «генеральную

совокупность» — посев, используя информацию о законах распределения основных характеристик растений по полю.

В настоящей работе в основном используется решение задачи 1.1 как непосредственно необходимое для предлагаемого метода расчета режима орошения.

1.6. Методика расчета требований яровой пшеницы к режиму влажности почвы

Вопросы управления продуктивностью искусственных агроэкосистем, по-видимому, могут быть эффективно решены в первую очередь на мелиорируемых землях. Однако на существующих гидромелиоративных системах как в зоне избыточного, так и в зоне недостаточного увлажнения урожаи сельскохозяйственных культур во многих случаях значительно ниже потенциально возможных. Даже на технически совершенных осушительно-увлажнительных системах, которые в состоянии обеспечить поддержание постоянного диапазона влажности почвы, происходит неизбежное снижение урожаев.

Представляется, что одной из основных объективных причин такого положения может быть недостаточное знание изменений требований растений к основным факторам внешней среды в период вегетации. В первую очередь это относится к требованиям растений к водному режиму. Помимо влаги, в формировании урожая большую роль играют тепловой, пищевой и воздушный режимы почвы, на которые можно воздействовать мелиоративными и агротехническими приемами.

Воздействие на все факторы роста и развития растений с целью их оптимизации сложно и подчас невозможно, поскольку недостаточно изучены также закономерности формирования условий внешней среды; кроме того, отдельные мелиоративные приемы, оптимизируя действие одного фактора, могут нарушить закон оптимума для другого, а следовательно, снизить суммарный эффект мелиоративно-агротехнических мероприятий. Поэтому, кроме сведений о требованиях растений к водному фактору, необходимо знать законы изменения требований растений в процессе вегетации к другим факторам внешней среды и их взаимосвязь в процессе роста и развития.

Таким образом, управление комплексом факторов внешней среды с целью получения максимального эффекта от управления искусственными агроэкосистемами может быть результативным при знании, с одной стороны, закономерностей формирования водного, воздушного, теплового и пищевого режимов почв и, с другой стороны, знания закономерностей изменения оптимальных условий роста и развития растений.

Требования сельскохозяйственных культур к условиям внешней среды можно описать осредненными зависимостями за

весь вегетационный период [11], имеющими вид куполообразных кривых, связывающих относительную продуктивность растения S , равную отношению полученного урожая к максимальному, с безразмерными факторами среды. Такое представление хотя и обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими, но имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что оно не позволяет дифференцированно учитывать потери продуктивности на каждый момент времени и влияние их на конечный урожай.

В связи с этим и была построена модель «растение—среда», описывающая изменения требований растений в каждый момент вегетации.

При подборе методов идентификации модели было поставлено условие, что исходной информацией для численной реализации такой модели должны служить данные о продуктивности растения, а также об условиях внешней среды, полученные на нескольких агрометстанциях (10—15) по стандартной методике за многолетний период. В качестве исходной информации были выбраны многолетние урожаи сельскохозяйственных культур на сортоиспытательных станциях, многолетние запасы влаги и температуры. При таком выборе возможно допущение, что уровень минерального питания оптимален для данной почвенно-климатической зоны.

Задача заключалась в том, чтобы на основании этих данных получить информацию об оптимальной влажности w_{opt} , показателе саморегулирования k в формуле (1.6а) и γ в формуле (1.8) в каждый момент вегетации для данного сельскохозяйственного растения и о потерях урожая при отклонении этих факторов от оптимального уровня.

Из общих соображений можно принять, что условия внешней среды $\varphi(\tau)$ являются фоном для реализации генетически заложенной в растении максимальной продуктивности U_{max} и отклонение их от оптимальных значений $\varphi_{opt}(\tau)$ приводит к неполной реализации U_{max} и, следовательно, потерям урожая. Здесь следует подчеркнуть, что такое влияние оказывают условия в каждый момент вегетации и конечная продуктивность является как бы отражением информации о внешних условиях, переработанной в единицах потерь продуктивности.

Таким образом, фактическую продуктивность (урожай) можно записать как

$$U = U_{max} \bar{S}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n),$$

где $\bar{S}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n)$ — относительная продуктивность с учетом влияния внешних условий в n моментах вегетации.

Среди значений φ в многолетнем разрезе обязательно должны появиться величины φ_{opt} т. е. такие значения фактора, при которых полностью используется потенциальная продуктивность сорта. Несомненно, что это имеет место лишь там, где

естественные условия внешней среды дают возможность проявить районированному сорту свои потенциальные возможности. В большинстве случаев ряд наблюдений за условиями среды ограничен десятью—двадцатью годами. В случае если для данного фактора из теоретических соображений или на основании опыта определен вид функции распределения, то для оценки ее параметров этого числа лет наблюдений вполне достаточно. Знание закона распределения позволяет удлинить фактический ряд методами стохастического моделирования. В том случае, когда не нужна случайная последовательность чисел с заданным законом распределения, представляющая стохастическую модель наблюдаемого явления, можно «расширить» наблюдения, используя математическое выражение функции распределения. Задаваясь определенной вероятностью или плотностью распределения, можно получить соответствующее ей значение физического параметра условий внешней среды. Видимо, в пределах $\pm 3\sigma$ такая операция для расчетов, не связанных с инженерными сооружениями (мосты, водосбросы, и т. п.), оправдана.

Таким образом, имея закон распределения фактора внешней среды (в данном случае влагозапасов), можно получить широкий спектр значений этого фактора и промоделировать его влияние на промежуточную и конечную продуктивность.

Подобным же образом можно поступить и для расширения статистического ряда урожаев сельскохозяйственной культуры. Далее, расширив таким образом информацию о факторах внешней среды и продуктивности растения, можно искать связь между ними. Попытки установить линейную связь между средним за вегетацию значением фактора и конечной продуктивностью не дали существенных результатов. Автором в [11] была показана форма нелинейного преобразования, позволяющая найти эту связь для ряда растений и широкого набора факторов внешней среды. Однако такое решение задачи не позволяет оценить отклонения условий среды от оптимального значения внутри вегетационного периода.

Поэтому, учитывая влияние каждого момента вегетации на конечную продуктивность, было предложено искать связь урожая с фактором среды ϕ за каждый период вегетации. При этом предлагалось меру тесноты связи оценивать корреляционным моментом [1] или коэффициентом корреляции. Можно предположить, что чем выше значение этого коэффициента, тем выше относительная продуктивность в данный момент, и существует некоторый диапазон влажности, где $r = r_{\max}$, который является оптимальным в данный момент времени. Перебирая последовательно влажности в диапазоне $\pm 3\sigma$, можно получить зависимость $5(w_{\text{opt}}, t)$.

Точность определения этой функции во времени зависит от дискретности исходных материалов наблюдений за факторами

среды и обуславливает то, что, с одной стороны, эта точность ограничена частотой наблюдений за влагозапасами по стандартной методике гидрометсети (нижняя граница), с другой — выбор продолжительности между смежными измерениями должен быть осуществлен с учетом биологических особенностей культуры и продолжительности фаз ее развития. Для большинства сельскохозяйственных культур этот период, по-видимому, не может быть больше одной декады.

При этом следует особо подчеркнуть, что коэффициент корреляции не используется в обычном смысле как множитель в уравнении регрессии, а является лишь мерой связности процессов, что накладывает на него менее жесткие требования по точности.

Таким образом, используя исходные ряды наблюдений U_j и w_{ij} (индексы i и j обозначают соответственно номер этапа или периода вегетации и номер географического пункта — $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, \mu$) и разбивая w_{ij} на k интервалов в долях a_w , можно определить элементы матрицы преобразованных величин влагозапасов по k -тому интервалу $\|w_{ij}^k\|$.

Далее вектор-столбец урожаев $\|U\|$ коррелируется с матрицей $\|w\|$, т. е. на каждом этапе вегетации связываются величины:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ U_j \\ \cdot \\ \cdot \\ U_\mu \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} w_{11}^1 & \dots & w_{11}^k & \dots & w_{11}^K \\ w_{1j}^1 & \dots & w_{1j}^k & \dots & w_{1j}^K \\ w_{1\mu}^1 & \dots & w_{1\mu}^k & \dots & w_{1\mu}^K \end{pmatrix}$$

В результате корреляции получается вектор-строка коэффициентов корреляции $\|r\| = \|r^1 \dots r^k \dots r^K\|$ для данного i -того момента времени.

Следует отметить, что область изменения влажности делится на K интервалов исходя из заданной точности определения функции $S(w, \tau)$. Рассматривая все значения k ($k=1, 2, \dots, K$), получаем матрицу $\|R\|$ коэффициентов корреляции размерности $I \times K$.

допустим, что при $w = 0$ (влажность завядания) относительная продуктивность $S = 0$, кроме того, $r = r_{\max}$ при $S=1$. Исходя из этого можно заменить переменную γ на S и получить матрицу $\|S\|$ из значений S_i^k , полагая при этом, что $S_i^k = 1$

соответствует максимальной интенсивности процессов жизнедеятельности растений, а $S_k^i = 0$ — минимальной. Максимальные значения S_k^i по столбцам матрицы $\|5\|$ будут соответствовать оптимальным внешним условиям, поэтому, выбирая значения $S_k^j = 1$, получаем оптимальное значение фактора как функции времени $w_{opt}(\tau)$.

Для водного фактора функции $w_{opt}(\tau)$ является полиэкстремальной и экстремумы соответствуют критическим периодам развития. Например, для яровой пшеницы максимумы $w_{opt}(\tau)$ приходятся на периоды кущения, трубкования, колошения и налива зерна. Это позволяет предполагать, что функция $w_{opt}(\tau)$, по крайней мере качественно, адекватно описывает процесс жизнедеятельности растений.

Для полной идентификации модели (1.8) необходимо вычислить еще параметр γ , характеризующий степень саморегулирования растения; найти этот параметр можно либо по значениям $S(w)$ в зоне w_{opt} , либо используя все точки $S_k(w)$.

В итоге расчета получаем ряд значений w_{opt} для фиксированных моментов времени вегетации, например в каждую декаду, и соответствующие значения коэффициента γ .

Вклад каждого этапа η ; в конечный урожай определяется физиологическими особенностями данного растения. Так, например, известно, что для яровой пшеницы наибольший удельный вес имеет период трубкование—колошение—цветение.

Метод, рассматриваемый выше, был применен для поиска требований растений к водному и температурному режимам. Поскольку в расчете выделяется лишь один фактор, следует потребовать, чтобы остальные факторы находились в оптимуме или имели фиксированное значение. Практически это можно сделать следующим образом. Например, при поисках оптимальной влажности $w_{opt}(\tau)$ использовать исходные данные о влагозапасах и урожаях, измеренных на сортоиспытательных станциях, т. е. в условиях постоянного и оптимального питания. Тепловой фактор можно учесть через радиационный, т. е. фиксировать радиационный режим, например фотосинтетически активную радиацию, и для каждого ее уровня определять функцию $w_{opt}(\tau)$. Далее, для получения общего вида функции следует обобщить влияние вида почв на величину расчетных влагозапасов. Этого можно достичь посредством использования продуктивных влагозапасов и нормировки их в долях от пористости.

В качестве примера были определены интервалы регулирования по водному режиму для яровой пшеницы, произрастающей в южных районах Западно-Сибирской равнины и в Северном Казахстане. Большинство рассматриваемых районов имеет неустойчивое увлажнение, засушливые или очень влажные годы здесь сменяются годами с оптимальной влажностью. Выбор

этих районов позволил получить широкий набор как различных условий увлажнения, так и урожаев.

Таким образом, была получена возможность пассивного моделирования формирования урожаев при различных условиях внешней среды.

Для расчета интервалов регулирования данные подготавливались следующим образом. По многолетним продуктивным влагозапасам в долях от полной продуктивной влагоемкости за период 1945—1970 гг. определялись на каждую декаду вегетации средние \bar{w}_i и средние квадратические отклонения a_i . Предполагалось, что закон распределения вероятности этих величин мало отличается от нормального.

По многолетним данным урожаев яровой пшеницы, произрастающей в тех же районах, были построены интегральные кривые распределения вероятностей и по ним определены урожаи 10, 25, 50, 75, 90 %-ной обеспеченности.

Урожаи заданной обеспеченности, величины средних многолетних влагозапасов и их средних квадратических отклонений по N пунктам выбранной зоны вводились в ЭВМ «Наири», на которой по приведенной выше схеме производились расчеты.

Результаты расчетов показывают, что общей чертой функций относительной продуктивности $S(w_1)$ является резкое падение продуктивности растений в критические моменты вегетации при отклонении влажности от оптимальной в сторону уменьшения. Примечательно, что это явление наблюдается независимо от обеспеченности урожайности, т. е. при любом радиационном режиме. Отклонение влажности от оптимальной в сторону увеличения также приводит к падению продуктивности растений. При 100 % доступной влажности продуктивность растений равна нулю.

Во все декады вегетации растения в некотором диапазоне влажности имеют довольно высокую продуктивность. Этот диапазон находится на уровне $S \geq 0,8$. Его и можно считать квазиоптимальным. Интересно отметить, что во время вегетации изменяется как оптимальная влажность w_{opt} , так и ширина условно-оптимального диапазона $d_{opt}(\gamma)$.

Требования растений за каждую декаду $S_i(w)$ можно представить в виде семейства изооптимальных линий за весь период вегетации. Графики $S(w)$ для урожаев различной вероятности $U_{10\%}, U_{25\%}, U_{50\%}, U_{75\%}, U_{90\%}$, имеют много общего. В частности, для всех обеспеченностей урожаев наблюдаются закономерные повышения зон оптимальных влагозапасов, приуроченных к критическим фазам. Примечательно также и то, что в зависимости от обеспеченности урожаев фазы сдвигаются по времени, что наблюдается и в природных условиях.

Согласно схеме расчета, для разных уровней урожаев были просчитаны все диапазоны, начиная от влажности завядания до полной влагоемкости, и несмотря на это, растение «выбрало»

в качестве оптимального тот уровень влажности, который является наследственным для данного вида.

Учитывая, что связь между суммой фотосинтетически активной радиации $R_{\text{ФАР}}$ за сезон и урожаем при прочих равных условиях линейная (1.10), аргумент функции распределения урожая $q(U)$ можно заменить на $R_{\text{ФАР}}$, при этом закон распределения не изменяется.

Интересно, что уровень оптимальной влажности w_{opt} для различных обеспеченностей урожая (радиации) возрастает при увеличении уровня радиации, что соответствует представлению об интенсификации деятельности растения в условиях высокой ФАР, выражающейся в интенсивном накоплении биомассы и, следовательно, более высоких скоростях подачи влаги к корневой системе, которое возможно лишь при высоких влагопроводностях, т. е. при высоких влажностях почвы.

Таким образом, можно предполагать, что развиваемый подход расчета требований растений к условиям внешней среды не противоречит физической сущности процессов и дает качественно удовлетворительные результаты. Вопросы количественной оценки точности расчета будут рассмотрены ниже.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

2.1. Введение

Наиболее общей постановкой вопроса формирования условий внешней среды является рассмотрение этих процессов как задач переноса энергии и вещества. Такая постановка включает в себя практически все интересующие нас субстанции.: влагу, газ, растворы, лучистую и тепловую энергию [2—13, 15, 16, 19, 20, 21]. В отличие от закономерностей биологических, физико-химические законы с количественной стороны наиболее развиты. Это обстоятельство объясняется относительной простотой последних.

Однако несмотря на то, что вопросы движения массы и вещества при фазовых переходах или без них в гомогенных и гетерогенных пористых средах получили широкое освещение в специальной физико-математической литературе, далеко не все решения, а точнее только некоторые, можно использовать для разработки методов регулирования внешних условий. Дело в том, что процессы, происходящие в природе, намного сложнее математически описанных элементарных процессов переноса энергии и вещества в модельных средах. Несмотря на это, существующие расчеты методов мелиорации позволяют в ряде случаев найти удовлетворительное для практических целей решение. В первую очередь это относится к вопросу управления грунтовыми водами.

Прежде всего следует отметить, что хотя рассматриваемые процессы переноса вещества и энергии описываются уже известными математическими моделями, при приложении их к новым расчетным схемам желательно заново сформулировать задачу и вывести соответствующее ей дифференциальное уравнение. Дело в том, что даже метод, которым решается задача, зависит от того, как она сформулирована, и часто физическая сущность задачи определяет пути ее решения [14].

Как известно, для математического описания довольно широкого класса физических явлений, таких, как распространение жидкости, газа, тепла, электричества в материальных средах, необходимо составить некоторую систему Дифференциальных уравнений. Основой для их составления служит уравнение баланса вещества, энергии, импульса. Однако уравнение

баланса может быть составлено на какой-то фиксированный момент времени. Для того чтобы знать изменение количества соответствующего фактора во времени, необходимо, кроме уравнения баланса, иметь уравнение, выражающее физический закон передачи данной формы материи через среду. Это может быть закон Дарси, закон Пуазейля, закон Фурье, закон Ома, закон Фика и ряд других. На основании этих законов можно составить уравнение движения, решение которого позволит вычислить изменение потенциала данного фактора во времени. Вместе с условиями однозначности эти три основные уравнения, которые иногда дополняются термодинамическим уравнением состояния, образуют замкнутую систему уравнений. Решение позволяет находить поле потенциала (температура, потенциал почвенной влаги и т. д.) в пространстве и изменение этих полей по времени.

2.2. Уравнения баланса

Рассмотрим некоторые особенности составления уравнений баланса для различных факторов применительно к задаче регулирования внешних условий. В первую очередь сама постановка основной задачи требует, чтобы в уравнениях баланса особое внимание было обращено на те составляющие, которые могут быть изменены инженерными или агротехническими методами.

Из этих потенциально управляемых составляющих баланса наиболее тщательному анализу должны подвергнуться те, которыми можно управлять непосредственно. Далее следует обратить внимание на отзывчивость к управлению, т. е. на долю, которую вкладывает в общий баланс управляемая величина при единичном управляющем воздействии.

Существует и еще одна особенность, которую необходимо учитывать при составлении уравнения баланса вещества—энергии. Эта особенность обусловлена тем, что регулирование внешней среды происходит для растения, и поэтому по мере возможности баланс должен составляться относительно растения.

Понимая, что это отнюдь не простая задача, следует все же попытаться сделать это, так как необходимо знать потоки энергии и вещества, которые поступают в растение и выходят из него. Эти потоки, а вернее, соотношения входящих и выходящих потоков, вообще говоря, определяют массу растения, а изменение их во времени — процесс роста (например, из этого следует, что необходимо отдельно знать транспирацию и физическое испарение).

Несомненно, что остаются в силе все требования к балансам различных субстанций в почве, которые обычно предъявляются,

т. е. независимое определение составляющих, соответствующая точность и достоверность составляющих, учет вертикального обмена расчетного слоя почвы с более глубокими слоями и т. д. [1].

Таким образом, с учетом сказанного выше, баланс вещества и энергии в системе почва—растение—воздух может быть записан в виде частных балансов для ряда слоев, существенно

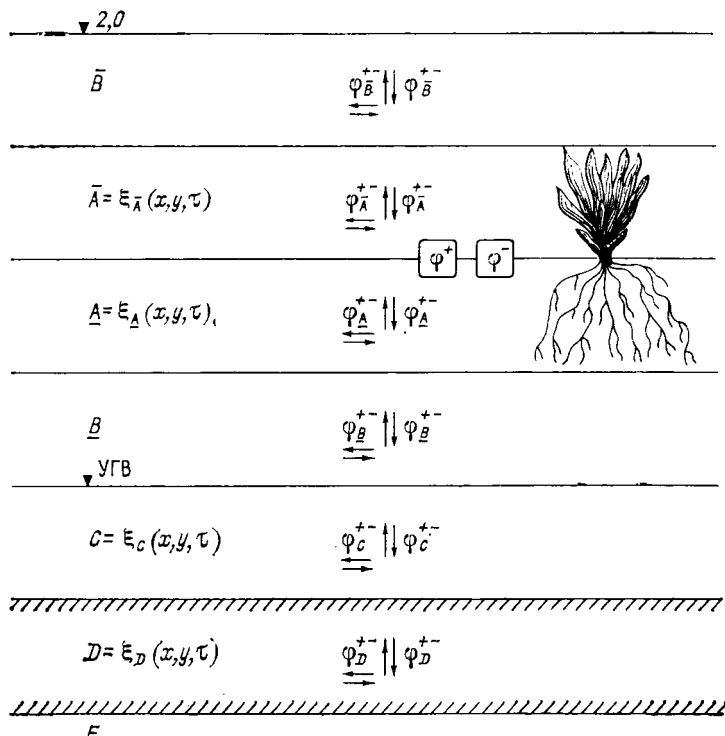


Рис. 1. Расчетная схема.
 ξ — случайная функция; — количество вещества или энергии *I*-ного фактора в *k*-том слое за *i*-тый период.

отличающихся своими функциями и свойствами. Введем следующие обозначения, принимая за начало координат поверхность почвы (рис. 1).

Слой \bar{A} — от поверхности почвы до верхней части растения. Мощность этого слоя $Z_{\bar{A}}$ является переменной величиной, случайно изменяющейся во времени $\xi_{\bar{A}}(\tau)$ и в пространстве $\xi_{\bar{A}}(x, y, z)$.

Слой \bar{B} — от верхушек растения до 2 м от поверхности почвы — уровня стандартного измерения основных метеорологических элементов и условной границы, на которой

метеорологические элементы мало зависят от подстилающей поверхности.

Слой \underline{A} — от поверхности земли до границы основной массы развития корневой системы. Мощность слоя $Z_{\underline{A}}$ является случайной функцией времени и координат, т. е. $\xi_{\underline{A}}(\tau, x, y)$.

Потоки вещества и энергии в этих слоях являются объектами мелиоративного регулирования. В слоях \bar{A} и \underline{A} может происходить поглощение или выделение энергии и вещества. Распределение источников—стоков в них можно представить в виде:

- а) равномерного распределения (источники заполняют все пространство);
- б) случайного распределения с заданным законом;
- в) источники сосредоточены в узлах в виде импульсных функций.

В слоях \bar{A} и \underline{A} горизонтальные обмены происходят в основном до момента смыкания крон и корней.

Слой \underline{B} является частью зоны аэрации, подстилающие слои \underline{A} и простирающийся до уровня грунтовых вод. Этот слой характеризуется относительно малым количеством источников (стоков) в виде корней растений и микроорганизмов.

Слой \underline{C} — зона полного насыщения грунтовых вод, снизу ограниченная первым относительным водоупором. Мощность этого слоя является случайной функцией в пространстве и времени $\xi_c(x, y, \tau)$.

Слой \underline{D} — мощность водоупора. Слой \underline{E} характеризует межпластовые воды.

Для одного слоя баланс можно записать в виде алгебраической суммы приходно-расходных статей и внутренних источников и стоков:

$$\Delta\varphi = (\overrightarrow{\varphi^+} + \overleftarrow{\varphi^+} + \uparrow\varphi^+ + \downarrow\varphi^+) - (\overrightarrow{\varphi^-} + \overleftarrow{\varphi^-} + \downarrow\varphi^- + \uparrow\varphi^-) + \varphi^+ - \varphi^-. \quad (2.1)$$

В общем случае баланс вещества и энергии может быть записан в следующем виде: для l -ного фактора, k — слоя и i — отрезка времени:

$$\Delta\varphi_{ilk} = \overleftrightarrow{\varphi^{+-}} + \uparrow\downarrow\varphi^{+-} \pm \varphi^{+-}, \quad (2.2)$$

где $\Delta\varphi_{ilk}$ — изменение количества вещества или энергии фактора в k -том слое за l -тый отрезок времени; $\overleftrightarrow{\varphi^{+-}}$ — входящие и выходящие в слой горизонтальные потоки вещества и энергии; $\uparrow\downarrow\varphi^{+-}$ — входящие и выходящие в слой вертикальные потоки вещества и энергии; φ^{+-} — внутренние источники и стоки.

Знаки потоков выбираются так, чтобы поток, входящий в слой, имел положительный знак, а поток, выходящий из слоя,— отрицательный знак.

Хотелось бы особо обратить внимание еще на одну особенность уравнения баланса. Составляющие его суть случайные функции координат и времени и только в частном случае, когда проводится осреднение по различным точкам мелиорируемого участка, т. е. при

$$\overline{\Delta\varphi_{ijk}} = \overline{\varphi^{+-}} + \overline{\uparrow\downarrow\varphi^{+-}} \pm \overline{\varphi^{+-}}, \quad (2.3)$$

уравнение баланса оказывается детерминированным. Проводя осреднение этого выражения во времени, получаем случай детерминированного среднего многолетнего баланса, в котором величины имеют равную интегральную вероятность (обеспеченность) при одинаковых законах их распределения. Если законы распределения различны (более реальный случай), то, вообще говоря, вероятности появления каждой составляющей баланса не равны.

В связи с этим возникает настоятельная необходимость изучить законы распределения отдельных составляющих баланса в пространстве и во времени. Это нужно в первую очередь для того, чтобы решить задачу о выборе необходимой вероятности составляющих уравнений баланса, и для того, чтобы получить заданную вероятность искомой величины, которая должна находиться из технико-экономического расчета. Попутно здесь возникает еще задача об устойчивости закона распределения данной составляющей.

Однако вследствие явной нестационарности системы воздух—растение—почва осреднение во времени (за отдельные периоды года) нужно проводить весьма осмотрительно, чтобы из-за осреднения не потерять существенной информации о процессе. В этой связи возникает задача об оптимальной (в смысле минимума) потере информации и о выборе периодов осреднения. Осреднение во времени и представление непрерывных составляющих баланса в виде дискретных значений является упрощением, которое приемлемо для общего анализа временного хода составляющей баланса, предназначенной к регулированию, но совершенно недостаточно для проведения оперативного регулирования данной составляющей, поэтому желательно знать непрерывный ход этих величин во времени, особенно во время вегетации.

2.3. Уравнения движения

Математически уравнения движения получаются из уравнений баланса и физических законов, определяющих потоки субстанции в зависимости от действующих сил. Эти законы

для интересующих нас факторов, согласно термодинамике необратимых процессов [17], записываются однообразно и представляют собой произведение проводимости данного потока на градиент обобщенного потенциала:

$$I_{ij} = \sum_j L_{ij} \text{grad } \Pi_j, \quad (2.4)$$

где I_{ij} — поток i -того вещества или энергии, т. е. количество субстанции, переносимое в единицу времени через единицу площади под действием j -того потенциала; Π_j — термодинамический потенциал (температура, химический потенциал, гидродинамические скорости и т. д.); L_{ij} — коэффициент проводимости, пропорциональный коэффициенту теплопроводности, диффузии, электропроводности, вязкости и т. д. и отражающий условия существования потока

В этом соотношении учитываются потоки, возникающие под действием так называемых перекрестных явлений; к таковым относятся термовлагоперенос, термодиффузионный перенос и т. д. Причем, согласно теореме Онзагера, $I_{ij} = I_{ji}$.

Уравнения движения, записанные в виде (2.4), имеют существенное преимущество в том смысле, что в этих уравнениях учитываются потоки под действием различных сил. Изменение общего потока влечет за собой перераспределение вкладов отдельных составляющих и, что самое главное, позволяет количественно учитывать эти вклады.

Выражение (2.4) следует рассматривать с точки зрения возможности активного управления потоками вещества и энергии. В самом деле, развернутая структура уравнений позволит оценить вклад каждого фактора в создание потока данной субстанции и, воздействуя на некоторые, менять величины и направления потоков. Другим способом изменения величины потока является воздействие на коэффициент проводимости L_{ij} . Заранее можно полагать, что такое воздействие особенно просто выполняется в капиллярно-пористой среде, проводимость которой существенным образом зависит от геометрии и физических свойств слагающего материала. Современные методы позволяют изменять не только геометрию капиллярно-пористого материала, но и его физические свойства.

Особенностью уравнения (2.4) при применении его к естественно сложившимся капиллярно-пористым средам (органическим и минеральным почвогрунтам) является то, что коэффициенты проводимости в этом уравнении стохастической природы, т. е. являются случайными функциями координат x , y , z . Поэтому можно полагать, что потоки по всему множеству измеряемых точек поля будут также случайными. Законы распределения этих потоков нетрудно установить, зная законы распределения проводимостей $g(I_{ij})$. По полученному закону распределения потоков $g(I_{ij})$ можно провести осреднение, т. е.

свести его к детерминированной величине. В зависимости от формы этого закона истинная средняя может существенно отличаться от средней арифметической. Одновременно в этой постановке решается вопрос об определении потока заданной обеспеченности.

Для того чтобы подсчитать поток, недостаточно знать лишь коэффициенты проводимости, необходимо иметь достаточную информацию об изменении поля потенциала в пространстве и во времени, т. е. $\Pi_{ij}(x, y, z, \tau)$.

Поле потенциалов интересующих нас субстанций определяется из уравнений движения. Для влаги, газа, питательных веществ и тепла в системе почва—растение—воздух эти уравнения могут быть записаны в виде следующей системы [12, 17]:

$$\rho\chi_j \partial\Pi_{ij}/\partial\tau = \sum_j L_{ij}\nabla^2\Pi_{ij} \pm I_{\pm}, \quad (2.5)$$

где $\rho\chi_i$ — объемная емкость по отношению к обобщенному заряду; $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$; i — номер потока; j — номер действующего потенциала.

Для коэффициентов проводимости в уравнении (2.5) справедливо соотношение взаимности, т. е. $L_{ji} = L_{ij}$.

Таким образом, уравнения (2.2), (2.4), (2.5) и условия однозначности составляют в большинстве случаев полную систему уравнений, позволяющих находить поле потенциалов и распределение потоков энергии и вещества в пространстве и во времени в почвенных слоях A и B (рис. 1).

2.4. Система задач при исследовании закономерностей формирования факторов внешней среды

Исходя из изложенного можно сформулировать задачи, которые необходимо решать независимо от конкретного вида регулируемого фактора внешней среды. Представим этот перечень в виде табл. 2.

Для расчета водообеспеченности яровой пшеницы ниже приводится вариант решения задачи П.7 — «Построение стохастических моделей отдельных составляющих баланса во временном разрезе $g[\varphi_i(\tau)]$ ». Для продуктивных влагозапасов почвы построена математическая модель в виде зависимостей (2.7) и (2.8) и системы стохастических дифференциальных уравнений (2.9). На основании этой модели удалось получить уравнение изменения влагозапасов во времени (п. 4.4) и предложить методику заблаговременного расчета математического ожидания влагозапасов на декадный (п. 4.4) и вегетационный

Таблица 2

Система задач при исследовании факторов внешней среды

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>П.1. Проверка возможности использования математических моделей типа (2.3), (2.4), (2.5) в задачах регулирования водного, пищевого и теплового режимов.</p>	<p>Подход структурный; методы решения экспериментально-теоретические. Проверка адекватности модели путем сравнения экспериментальных данных комплексного эксперимента и теоретического решения. Оценка величины расхождения и выводы критериев адекватности модели.</p>	<p>Основные дифференциальные уравнения, условия однозначности, экспериментальный материал.</p>	<p>1. Возможности обоснованного использования существующих моделей или их уточнение. 2. Получение границ применимости математических моделей в различных случаях.</p>
<p>П.2. Выявление и анализ потенциально управляемых составляющих уравнения баланса (2.3).</p>	<p>Подход качественный; метод решения теоретический. На основании физических законов определяется отзывчивость каждой составляющей баланса энергии и вещества на внешнее воздействие.</p>	<p>Уравнения баланса. Физические свойства составляющих.</p>	<p>Получение перечня величин, которые потенциально могут служить объектом мелиоративных воздействий.</p>
<p>П.3. Выявление и анализ технически управляемых составляющих уравнения баланса (2.3).</p>	<p>См. задачу П.2.</p>	<p>Уравнения баланса. Физические законы. Способы мелиорации. Связь между отдельными составляющими.</p>	<p>Получение перечня величин, управляемых прямо или косвенно при современном состоянии техники мелиорации.</p>
<p>П.4. Определение количественной характеристики управляемости составляющих.</p>	<p>Подход структурный; метод решения экспериментально-теоретический. Определяется реакция модели составляющей баланса на единичное воздействие (изменение потенциалов и проводимости)</p>	<p>Результаты решения задачи П.3. Физические законы типа (2.4).</p>	<p>Отбор существенно управляемых величин.</p>

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
II.4.1. Прямое управление.	То же	То же	Выбор величин прямого управления"
II.4.2. Косвенное управление.	Определение реакции модели составляющей баланса на единичное изменение сопряженной с ней величины.	Данные задачи II.4 и физические закономерности взаимосвязи между отдельными составляющими баланса.	Выбор косвенно управляемых величин.
II.5. Расчет и измерение потоков вещества и энергии, входящих и выходящих из растения.	Подход структурно-функциональный; методы решения экспериментально-теоретические.	Математическая модель поглощения—выделения вещества и энергии растением. Характеристики проводимости системы корни—почва, листья—воздух; потенциалы, действующие в этих системах.	Появится возможность расчета количества накопленной энергии и вещества и связи его с продуктивностью растения.
II.5.1. Расчет и измерение потенциалов, действующих в системах корни—почва, листья—воздух.	Подход функциональный; методы решения теоретико-экспериментальные.	Комплекс измерительных приборов.	Данные используются для решения задачи II.5.
II.5.2. Измерение проводимости в системах корни—почва, листья—воздух.	Методы экспериментальные.	Комплекс измерительных устройств.	Данные используются для решения задачи II.5.
II.6. Построение стохастического варианта уравнения баланса $g[\varphi_i(\tau)]$.	Подход теоретико-вероятностный	Закон распределения составляющих баланса $g[\varphi_i(\tau)]$.	Возможность получения многомерного закона распределения и обоснованный выбор вероятности искомой составляющей при заданных вероятностях входящих величин.
II.7. Построение стохастических моделей отдельных составляющих баланса во временном разрезе $g[\varphi_i(\tau)]$.	Метод экспериментально-теоретический.	Экспериментальные статистики $\Phi_i(\tau)$.	Использование результатов в задаче II.6.

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>II.8. Нахождение законов распределения случайных составляющих баланса по площади мелиорируемого участка.</p>	<p>Метод экспериментально-статистический.</p>	<p>Экспериментальные статистики $\varphi_i(x, y)$.</p>	<p>Определение расчетных значений регулируемых составляющих баланса с заданной вероятностью. Возможность проведения объективного осреднения параметра.</p>
<p>II.9. Построение стохастической модели изменения мощности слоев \bar{A} и \underline{A}. II.9.1. По площади слоя мелиорируемого участка. II.9.2. Во время вегетации.</p>	<p>Подход теоретико-вероятностный, методы решения: на основании экспериментальных данных исходя из гипотезы о применимости Марковского процесса к этой задаче строится математическая модель.</p>	<p>Экспериментальные статистики $\begin{matrix} \text{мощности} \\ \bar{A}(x, y, \tau), \\ \underline{A}(x, y, \tau). \end{matrix}$</p>	<p>Возможность объективного осреднения мощности слоев для введения их в уравнение баланса.</p>
<p>II.10. Построение математической модели расположения стоков—источников в слоях \bar{A} и \underline{A} и изменения их интенсивности во времени.</p>	<p>Подход структурный; методы решения: априорный выбор расположения стоков и сопоставление модели с экспериментом.</p>	<p>Физиологические данные о расположении, густоте и функционировании корневой и листовой систем растений, а также о плотности и расположении микроорганизмов.</p>	<p>Четкое представление об источниках—стоках в слоях \bar{A} и \underline{A} позволит выявить механизмы поступления в корневую систему и кроны растений интегральных потоков вещества и энергии.</p>
<p>II.11. Построение математико-экономической модели процесса выбора заданной вероятности составляющих баланса.</p>	<p>Подход функциональный.</p>	<p>Законы распределения составляющих баланса. Связи между экономическими показателями и уровнем вероятности.</p>	<p>Экономическое обоснование выбора расчетной обеспеченности, позволяющее правильно назначать соответствующие регулирующие мероприятия.</p>
<p>II.12. Обоснование необходимой точности и частоты измерений составляющих баланса.</p>	<p>Методы экспериментальные, статистические.</p>	<p>Ошибки используемых методов. Функции изменения φ_i по координате и времени. Связь между стоимостью измерений и точностью.</p>	<p>Возможность обоснованного назначения оптимальной частоты и точности измерений, согласно экономическим критериям, позволит обосновать объем изысканий и исследований на мелиорируемых площадях.</p>

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>11.13. Методические задачи.</p> <p>П.13.1. Количественное определение понятия однородности массива, участка и т. д.</p> <p>П.13.2. Количественное определение понятия средней точки, типичной точки, вероятной точки и т. д.</p> <p>П.13.3. Количественное определение многопараметрической типичности мелиоративных объектов.</p>	<p>Методы теоретико-статистические.</p> <p>Методы решения вероятностно-множественные.</p>	<p>Законы распределения соответствующих величин.</p> <p>Законы распределения параметров. Характеристика эталонов. Критерии типичности.</p>	<p>Позволит сократить объемы измерений при исследованиях и изысканиях.</p> <p>Позволит сократить объемы изысканий и проектирования на типичных участках. Появится возможность использовать ЭВМ при проектировании.</p>
<p>11.14. Установление статистических связей между составляющими баланса.</p>	<p>Методы статистические.</p>	<p>Экспериментальные статистики.</p>	<p>Возможность расчетов трудноизмеримых величин.</p>
<p>11.15. Качественное определение действительных потенциалов Π_{ij}.</p>	<p>Подход термодинамический.</p>	<p>Физическое описание потоков.</p>	<p>Правильное определение действующих потенциалов гарантирует от ошибок в величинах суммарных потоков.</p>
<p>11.16. Разработка системы безынерционных измерений действующих потенциалов в системе почва—растение—воздух.</p>			<p>Возможность получения истинных величин потенциала в текущий момент.</p>
<p>11.17. Создание математической модели инерционных измерителей потенциалов Π_{ij}.</p>	<p>Подход структурный; метод — составление и решение задачи об инерционности измерения потенциала.</p>	<p>Представление о физической сути процесса изменения.</p>	<p>Возможность обработки результатов измерений инерционными измерителями и получение истинной функции $\Pi(\tau)$.</p>

Задачи	1 Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>11.18. Разработка комплекса измерительных приборов для получения коэффициентов проводимости капиллярно-пористой среды.</p>			<p>Такой комплекс приборов является необходимым экспериментальным оборудованием для решения задач второго этапа.</p>
<p>11.19. Определение законов распределения проводимостей $g[L_{ij}(x, y, z, \tau)]$.</p>	<p>Метод статистический.</p>	<p>Экспериментальные статистики.</p>	<p>Позволит обоснованно выбрать расчетную величину коэффициента проводимости в полевых условиях.</p>
<p>11.20. Построение стохастической модели изменений потоков $\xi[I(x, y, z, \tau)]$.</p>	<p>Метод статистико-вероятностный; на основании законов распределения и физических закономерностей составляются функции $\xi[I(x, y, z, \tau)]$.</p>	<p>Законы распределения $g[I(x, y, Z, \tau)]$.</p>	<p>Выбор обоснованного среднего и величин потоков заданной вероятности.</p>
<p>11.21. Изучение составляющих потоков с целью выявления вероятности управления суммарным потоком посредством управления отдельными слагаемыми.</p>	<p>Подход структурный. Определяются отдельные слагаемые потоков, устанавливаются их взаимосвязи через Выделяются существенно управляемые слагаемые. Проводится анализ возможности управления суммарным потоком.</p>	<p>Значения L, Π</p>	<p>Выявление внутренней связи между управляемостью суммарного потока и управляемостью отдельных составляющих позволит выявить новые методы управления.</p>
<p>11.22. Оценка возможности управления (изменения) величинами проводимости L_{ij} и влияния их изменения на суммарный поток.</p>		<p>Значения L_{ij} и методы управления ими.</p>	<p>Оценка возможности управления проводимостью позволяет разработать способы управления потоками.</p>

Задачи	Подходы и методы решения	Исходные данные	Ожидаемые результаты
<p>11.23. Разработка методов прогноза изменений величин потоков, потенциалов и проводимостей: а) детерминированного, б) стохастического.</p> <p>11.23.1. Краткосрочные прогнозы.</p> <p>11.23.2. Долгосрочные прогнозы.</p>	<p>Подход структурный. Метод: составление и решение дифференциальных уравнений процессов эволюции потоков, потенциалов и проводимостей.</p>	<p>Начальное распределение исходных параметров. История процесса (случайные функции). Уравнения эволюции процессов.</p>	<p>Возможно использование при оперативном регулировании.</p> <p>Используются для определения общей стратегии регулирования на период вегетации и оценки влияния мелiorаций на окружающую среду.</p>

(п. 4.3) периоды. Это является одним из возможных реализаций пункта 11.236 — «Разработка стохастических методов прогноза изменений величин потоков, потенциалов и проводимостей» и подзадач 11.23.1 и 11.23.2.

Изложенная система задач не претендует на абсолютную полноту и, видимо, может расширяться и углубляться. В то же время блочная структура взаимосвязи между ними и концепция классификации их на основе математических моделей (2.2), (2.4), (2.5) дает возможность охватить основные задачи, встречающиеся при изучении процессов формирования комплекса условий внешней среды.

2.5. Некоторые стохастические методы описания закономерностей формирования условий внешней среды

Выше было упомянуто, что при расчете потоков и потенциалов различных субстанций большую роль играет стохастическая природа не только структуры пористого пространства почвогрунтов, но и случайность атмосферных процессов. Влияние стохастичности столь велико, что порою расчеты, выполненные по детерминированным моделям, далеки от природных процессов.

Для определения водообеспеченности яровой пшеницы и расчета режима водоподачи необходима информация о режиме влажности почвы в расчетном слое. В настоящее время для математического описания режима влажности почвы широко используются вероятностные методы, основанные на представлении влажности в каждый момент вегетации случайной величиной с установленным законом распределения. Такой подход может удовлетворить при расчете проектного режима орошения. Однако он обладает существенным недостатком, так как не учитывает взаимосвязи влажностей в смежные декады. Изменение влажности в естественных условиях под сельскохозяйственной культурой можно описать более полно, рассмотрев влагозапасы как случайный процесс и используя соответствующий математический аппарат.

Выбор математического аппарата для описания случайных процессов зависит от класса случайного процесса, который соответствует его внутренней структуре. Структура процесса может быть определена из теоретических соображений, а характеристики его рассчитаны на основе экспериментальных данных.

Будем полагать, что процесс изменения влажности во времени может быть описан цепью Маркова. В поддержку этого предположения, которое попытаемся доказать ниже, приведем высказывание В. Феллера [18].

«По существу марковский процесс есть вероятностная аналогия процессов классической механики, в которых дальнейшее развитие процесса вполне определено состоянием в настоящий момент и не зависит от способа, которым это состояние достигнуто. Эти механические процессы противоположны процессам с последствием, возникающим, например, в теории пластичности, где вся предыдущая история системы влияет на ее будущее. В стохастических процессах будущее никогда не бывает однозначно определенным, но все же имеются вероятностные соотношения, дающие возможность делать предсказания».

Случайный процесс формирования влажности $\xi(w_0, \tau)$ обусловлен случайным процессом выпадения осадков $\omega(m, \tau)$ и случайным процессом расходования воды посевом $\xi(l, \tau)$.

Особенностью процессов формирования влажности является то, что последующий ход их зависит в основном от предыдущего состояния. Это положение можно подтвердить уравнением водного баланса, в которое входят элементы только настоящего и непосредственно предшествующего ему моментов времени. Влажность в предшествующую декаду содержит всю информацию о прошедших процессах, и только от нее зависит характер формирования влажности в настоящий момент (режим испарения, грунтового водообмена и др.).

Представление о связи между смежными моментами времени может дать автокорреляционная функция, вычисленная

для ряда лет со сдвигом по времени в одну декаду. В случае если коэффициент корреляции будет резко убывать во времени, это можно считать показателем отсутствия связи между смежными моментами.

Предварительный анализ показал, что автокорреляционная функция влагозапасов имеет затухающий характер и через две декады связь между влагозапасами становится недостоверной. Исходя из этого в первом приближении будем считать процесс изменения влажности случайным марковским процессом. Однако этот класс процессов достаточно широк, поэтому необходимо далее рассмотреть, к какому именно подклассу относится процесс изменения влажности.

Влажность почвы в многолетнем разрезе под рассматриваемой сельскохозяйственной культурой может иметь ряд состояний, вероятность перехода из которых в любое другое определяется стохастической матрицей. Вследствие того что наблюдения за влажностью обычно не превышают 20—30 лет, для получения матрицы переходной вероятности целесообразно использовать предположение об эргодичности цепи, тогда возможно объединение всех экспериментальных данных за различные декады в одну цепь.

По определению [7], марковская цепь называется эргодической, если из каждого состояния влажности в данный момент можно попасть в любое другое состояние. Таким свойством обладает регулярная цепь. Для проверки цепи изменения влажности на регулярность необходимо вычислить матрицу переходных вероятностей.

Обычно эта матрица для пяти градаций влажности имеет вид:

$$\|P_w\| = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & 0 & 0 \\ 0 & P_{32} & P_{33} & P_{34} & 0 \\ 0 & 0 & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & P_{54} & P_{55} \end{vmatrix} \quad (2.6)$$

при этом $P_{ij} \geq 0$ и $\sum P_{kj} = 1$, где k — номер строки.

Возводя матрицу $\|P_w\|^2$ последовательно в 2, 3, 4-ю и т. д. степени, отмечаем момент, когда все элементы $P_{ij} > 0$. Как будет показано ниже, при $\|P_w\|^2$ число неотрицательных элементов уменьшается в два раза; при $\|P_w\|^3$ — в шесть раз и уже при $\|P_w\|^4$ число неотрицательных элементов равно нулю.

Таким образом, марковский процесс формирования влажности в естественных условиях является регулярным и, следовательно, эргодическим.

Интересно, что матрица $\|P_w\|$ обладает свойством консервативности, т. е. система, попадая в то или иное состояние,

с большей вероятностью остается в нем. Исключением из этого правила является состояние, в котором влажность превышает наименьшую влагоемкость и является более подвижной.

Таким образом, этот процесс можно рассматривать как простую однородную цепь Маркова с конечным числом состояний.

После расчета переходной матрицы $\|P_w\|$ можно рассчитать вероятности всех состояний в каждый момент времени. Для этого необходимо знать начальное состояние влажности в момент начала вегетации и матрицу вероятности перехода влажности в различные состояния (2.6).

Рекуррентная формула, в которой каждая последующая матрица состояний получается путем умножения предыдущей на переходную матрицу, может быть записана в следующем виде:

$$\|P^{(k)}\| = \|P^{(k-1)}\| \|P_w\|, \quad (2.7)$$

$$\|P^{(k)}\| = \|P_w\|^k. \quad (2.8)$$

Таким образом, матрица вероятности состояний в 6-тую декаду равна k -той степени переходной матрицы.

Имея в каждую декаду (пятидневку) вегетации матрицы вероятностей состояний влажности, можно использовать их для оценки сложившихся естественных условий, так как в них содержится вся статистическая информация о путях изменения влажности при любых начальных условиях при широком наборе погодных факторов (набор этот ограничивает лишь степень полноты исходного массива наблюдений за влажностью).

Возможные траектории изменения влажности во времени для рассматриваемого случая можно представить в виде графика стохастического прогноза влажности. Прогноз на следующую декаду существенным образом может уточниться при известной влажности на конец текущей декады.

Уточнение прогноза может быть также достигнуто путем увеличения числа состояний (градаций) влажности. Схема расчета при этом и принципиальные положения не изменятся.

Интересно отметить, что в матрицах вероятностей состояний $\|P^1\|$, $\|P^3\|$, $\|P^5\|$, $\|P^9\|$ с увеличением времени замечается тенденция выравнивания значений вероятностей в столбцах. Можно предположить, что существует некоторая предельная матрица состояний, в которой все строки одинаковы. Это предположение теоретически обосновано для эргодических процессов. Поскольку выше была установлена эргодичность процесса естественного формирования влажности, можно определить эту предельную матрицу следующим образом. Учитывая, что процесс изменения влажности непрерывный, составим дифференциальные уравнения Колмогорова [18] изменения вероятности состояний во времени.

Для матрицы (2.6) можно записать систему уравнений Колморорова:

$$\left. \begin{aligned} dP_1/d\tau &= -P_{12}P_1 + P_{21}P_2, \\ dP_2/d\tau &= -P_{23}P_2 + P_{32}P_3, \\ dP_3/d\tau &= -P_{34}P_3 + P_{43}P_4, \\ dP_4/d\tau &= -P_{45}P_4 + P_{54}P_5, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Предельное состояние определяется при условии $dP/d\tau = 0$, тогда система дифференциальных уравнений (2.9) превращается в систему алгебраических уравнений. Решение этой системы дает значения компонент неподвижного вероятностного вектора в предельной матрице:

$$\| P_{ij}^{(\infty)} \| = \{ P_1^{(\infty)} P_2^{(\infty)} P_3^{(\infty)} P_4^{(\infty)} P_5^{(\infty)} \}. \quad (2.10)$$

Вероятность состояний в этой матрице можно рассматривать как относительное время пребывания в нем.

Подводя итог этой части работы, можно отметить, что в первом приближении стохастическими методами можно прогнозировать влажность почвы как краткосрочно, на основе расчета стохастических траекторий в каждую декаду, так и долгосрочно на основе матриц предельных состояний.

РАСЧЕТ ТРЕБОВАНИЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ К РЕЖИМУ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

3.1. Анализ урожайности яровой пшеницы

Для решения поставленной задачи рассматривались районы страны, которые являются основными производителями яровой пшеницы (Зауралье, Западная Сибирь, Северный Казахстан) [8]. Они расположены от широты Тобольска до Целинограда и от долготы Свердловска до Новосибирска. Здесь около 51 % посевов яровой пшеницы находятся в засушливых и сильно-засушливых районах, 24 % в районах недостаточного увлажнения и только 24 % в районах с оптимальным увлажнением [8].

В северной части рассматриваемого района средняя многолетняя величина ФАР составляет около 25 ккал/см² за период вегетации (температура выше 5°C), в южной части — около 35 ккал/см² за вегетацию [6]. Это соответствует среднему многолетнему потенциальному урожаю яровой пшеницы при оптимальных водном и пищевом режимах на севере 2,5 т/га, на юге 7,5 т/га. Коэффициенты вариации ФАР в отдельных случаях для различных пунктов могут составлять около 7 % [16], поэтому максимальные урожаи яровой пшеницы в различные годы колеблются в значительных пределах (от 3,5 до 6,5 т/га) только за счет колебаний ФАР.

Не останавливаясь подробно на климатическом описании рассматриваемого района, приводим в табл. 3 (составлена Н. А. Байбаевой) основные климатические характеристики для северных и южных границ района.

Почвы на севере рассматриваемого района в основном дерново-подзолистые, на юге — обыкновенные и выщелоченные черноземы, переходящие в каштановые почвы. По механическому составу они могут быть разделены на следующие категории: тяжелые, средние и легкие суглинки, иногда встречаются и супесчаные [1].

Большое разнообразие почвенных и климатических условий данного района, чередование лет с оптимальным и неоптимальным увлажнением почвы дают возможность (после соответствующей обработки урожаев и условий внешней среды) получить достаточную информацию о требованиях яровой пшеницы к этим условиям.

Климатические характеристики

Метеорологическая станция	Температура воздуха, °С		Заморозки				Осадки, мм			ФАР за период с $t < 5^{\circ}\text{C}$ ккал/см ²		
	Средняя за июль	Сумма активных температур ($t < 5^{\circ}\text{C}$) за вегетационный период	средняя дата		средняя продолжительность безморозного периода, дни	самая ранняя дата первого заморозка	самая поздняя дата последнего заморозка	количество за год	сумма за май - август			
			последнего заморозка	первого заморозка					наименьшая ($P_{0\text{C}} = 80\%$)		наибольшая ($P_{0\text{C}} = 20\%$)	
												средняя
Тобольск	18,0	2092	19 V	22 IX	125	11 VI	5 IX	463	241	137	566	25,1
Тара	17,7	2124	26 V	9 IX	105	8 VI	11 VIII	444	248	137	564	—
Шадринск	18,9	2398	20 V	18 IX	120	7 VI	21 VIII	406	207	107	547	—
Йшим	18,0	2186	26 V	12 IX	108	15 VI	12 VIII	351	204	106	511	—
Черлак	19,3	2159	16 V	21 IX	127	29 V	5 IX	302	168	86,1	425,1	32,8
Оренбург	21,3	2840	11 V	21 IX	132	7 VI	29 VIII	337	143	56	509	38,0
Мартук	21,9	2915	10 V	25 IX	137	2 VI	5 IX	257	111	37,1	345,1	43,8
Комсомолец	19,5	2477	21 V	16 IX	117	12 VI	24 VIII	301	157	63,1	400,1	36,1
Михайловка	19,8	2466	23 V	15 IX	114	18 VI	24 VIII	305	169	80	473	—
Ключи	20,3	2580	18 V	21 IX	125	30 V	1 IX	253	147	69,1	399,1	—
Новосибирск	18,7	2210	20 V	18 IX	120	7 VI	29 VIII	425	228	110,1	505,1	30,4
Целиноград	20,2	2526	15 V	16 IX	123	10 VI	25 VIII	297	154	64	436	34,6

¹ Количество осадков взято по ближайшей станции.

Для более полной характеристики рассматриваемой зоны в работе анализируются данные об урожаях в районах, непосредственно прилегающих к этой зоне.

Согласно принятой схеме, в первую очередь изучались данные об урожайности стандартных сортов твердой и мягкой яровой пшеницы. Далее рассматривались условия внешней среды.

Для получения полной информации о средних величинах и варьировании урожаев твердой и мягкой яровой пшеницы были собраны и обработаны данные об урожаях по 303 государственным сортоиспытательным участкам за 32 года (с 1938 по 1970 г.). Таким образом, были обработаны данные около 5000 годостанций.

Анализ этих данных показал, что урожаи яровой пшеницы в пределах областей меняются незначительно, но в то же время варьирование этих урожаев по годам весьма существенно и колеблется от 30 до 98 %.

Средние многолетние урожаи мягкой яровой пшеницы (1,6—2,0 т/га) были получены на сортоучастках большей части Украины, в центрально-черноземной зоне и в ряде правобережных районов Среднего Поволжья (Пензенская область и автономные республики Поволжья). Однако в этих районах урожай озимой пшеницы значительно выше яровой.

Наиболее неблагоприятные районы для возделывания мягкой яровой пшеницы без орошения расположены к югу и востоку от линии Ворошиловград, Саратов, Куйбышев, Илек (Оренбургской области). Средний урожай яровой пшеницы здесь составил (по данным ГСУ) 0,8—1,2 т/га, а в некоторых районах Нижнего Поволжья даже 0,4—0,8 т/га. Особо следует обратить внимание на то, что здесь урожаи ГСУ в большинстве случаев в 2—4 раза больше, чем средние областные хозяйственные урожаи.

Кроме низких средних урожаев, в Левобережье Среднего и Нижнего Поволжья наблюдается большая изменчивость урожаев по годам. Так, на Камышинском ГСУ при средних урожаях 0,54 т/га и максимальных урожаях 1,0—1,2 т/га коэффициент вариации превышает 80%. Это характерно как для мягких, так и для твердых пшениц. На основании приведенных данных можно сделать вывод о крайней неустойчивости урожаев в естественных условиях.

Интересно, что при орошении, несмотря на значительное повышение средних урожаев (в 3—4 раза), амплитуды колебания их в многолетнем разрезе остаются приблизительно такими же, как и на неорошаемых участках. В качестве примера можно привести Пугачевский ГСУ Саратовской области. При средних урожаях твердых сортов за 30 лет 1,98 т/га коэффициент вариации составил 55%, а на неорошаемых землях других ГСУ Саратовской области — 66%.

Рассмотрим районы Западной Сибири, в частности области, в которых яровые пшеницы имеют большой удельный вес. К таким областям можно отнести Курганскую, Омскую, Новосибирскую и Алтайский край. В отдельные годы (например, в 1972 г.) эти районы являются основными поставщиками зерна. Озимые пшеницы не возделываются здесь из-за суровости климата. Следует отметить, что здесь средние величины урожаев значительно выше (в 1,5—2 раза), чем в районах Поволжья.

Другой характерной чертой районов Западной Сибири можно считать меньший, чем в Поволжье, коэффициент вариации. Так, по трем областям и в Алтайском крае он колеблется в пределах 20—45 % (исключая районы Кулундинской и Барабинской степей, где C_v составляет 60—70 %). Таким образом, районы Западной Сибири, по-видимому, имеют более благоприятные условия для произрастания яровой пшеницы.

Для выявления областей с условиями большей или меньшей оптимальности произрастания, яровой пшеницы целесообразно построить карты изолиний урожайности рассматриваемых районов.

3.1.1 Картирование урожаев яровой пшеницы по госсортоучасткам¹

При картировании урожаев возникают задачи выбора градаций и детальности картирования. По результатам обработки на ЭВМ «Наири» были составлены карты средних многолетних относительных урожаев стандартных сортов мягкой и твердой пшеницы (рис. 2 и 3). В качестве основной была выбрана градация 0,4 т/га, так как при урожае на ГСУ менее 0,4 т/га урожай зерна в хозяйствах близок к нулю. Все величины нормировались на урожай 2,0 т/га.

Районы со средним многолетним урожаем 0,4—0,8 т/га (0,2—0,4) могут быть отнесены к районам с очень низкими крайне неустойчивыми урожаями ($C_v = 80 \div 105\%$). Это Нижнее Поволжье, восточные районы Ставрополя и некоторые районы Актюбинской и Уральской областей.

Районы со средними многолетними урожаями 0,8—1,2 т/га (0,4—0,6) отнесены к районам с низкими неустойчивыми урожаями, хотя колебания их по годам несколько меньше ($C_v = 50 \div 80\%$). Это восточные районы Харьковской, Ворошиловградской, Ростовской областей, часть Среднего Поволжья (южнее Куйбышева), западные и южные области Казахстана.

Следующая градация, принятая при картировании, 1,2—1,6 т/га (0,6—0,8). Районы с таким урожаем можно

¹ Составление и описание карт выполнено совместно с Н. А. Байбаевой.

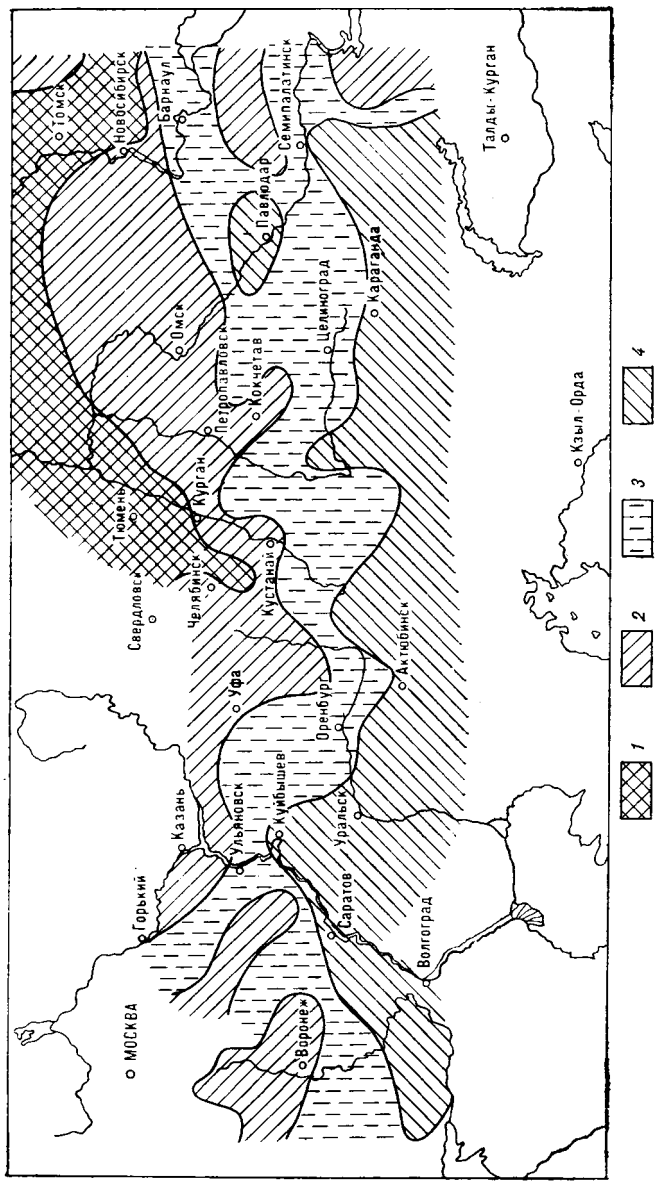


Рис. 2. Средний относительный урожай мягкой яровой пшеницы за 1938—1970 гг. (по данным ГСУ).

1) > 1,0; 2) 0,8—1,0; 3) 0,6—0,8; 4) 0,4—0,6.

характеризовать как среднеурожайные. Колебания урожаев по годам составляют 40—50 %, т. е. урожаи более устойчивые. Сюда можно отнести большую часть Среднего Поволжья, Оренбургскую область и прилегающие к ней районы Башкирии, большую часть Кустанайской области, Тургайскую, Целиноградскую области и часть Алтайского края.

Средние урожаи 1,6—2,0 т/га можно рассматривать как *средневысокие, хотя колебания их по годам примерно такие же* ($C_v = 30 \div 50$ %). Средневысокие урожаи ($\geq 2,0$ т/га) наблюдались в большинстве районов Курганской, Тюменской, Кемеровской областей и в Томской области. В этих районах преобладают посевы сортов мягкой пшеницы, так как твердые сорта не вызревают.

Таким образом, анализ карт средней урожайности яровой пшеницы приводит к выводу, что средние многолетние урожаи в естественных условиях в Западной Сибири выше, чем в Поволжье.

Карты средних относительных урожаев показывают тенденцию изменения урожаев по территории в среднем по условиям года, однако они не позволяют установить потенциальные возможности производства зерна на данной территории при оптимальных агрометеорологических условиях. Одним из путей получения такой информации может служить анализ карт урожаев стандартных сортов яровой пшеницы по госсортоучасткам в годы с максимальной урожайностью. Такие карты могут показать, насколько увеличатся урожаи при создании оптимальных условий (орошение, осушение, минеральное питание) (рис. 4 и 5).

Наиболее высокие урожаи $>4,0$ т/га при оптимальных агрометеорологических условиях наблюдались в Липецкой, Тамбовской областях и на севере Воронежской области, в ряде районов Верхнего Поволжья, на Урале, в ряде районов Томской и Кемеровской областей.

Урожай 3,1—4,0 т/га был в большей части земледельческих районов Западной Сибири, на самом севере и на востоке Казахстана, в Поволжье (северо-западнее линии Саратов—Куйбышев) и в центрально-черноземной зоне.

В восточных районах Украины, в большинстве районов Поволжья и севера Казахстана урожаи яровой пшеницы при условиях, близких к оптимальным, составили 2,1 — 3,0 т/га.

Наиболее низкие урожаи $<2,0$ т/га даже во влажные годы отмечены на востоке Ставрополя, на юге Волгоградской области, на юге Уральской, Тургайской, Целиноградской областей и в центре Актюбинской области. Следует отметить, что зона с высокими потенциальными урожаями $>3,0$ —4,0 т/га, расположенная на юге Западно-Сибирской низменности, подвержена

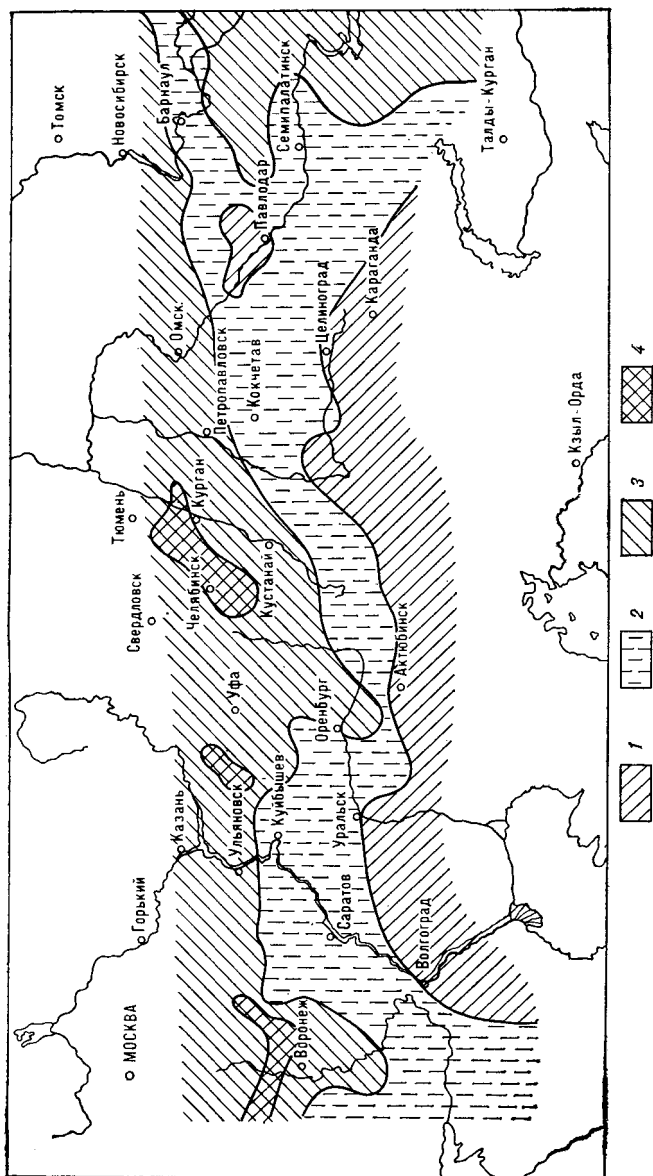


Рис. 5. Урожай стандартных сортов твердой яровой пшеницы при оптимальных агрометеорологических условиях.

Усл. обозначения см. рис. 4.

заморозкам [4], приводящим к повреждению невызревшего зерна яровой пшеницы, а также частым переувлажнениям, что при низкой дренируемости почвы приводит к недобору или гибели урожая.

Таким образом, данные приведенных карт позволяют предположить, что потенциальные возможности рассматриваемых зон по радиационным и пищевым условиям реализуются в случае оптимального увлажнения. Представляется, что при подаче дополнительного количества влаги в зоны с урожаями 2,1—3,0 т/га появится возможность еще более увеличить потенциальные возможности производства зерна.

Как известно, процесс изменения урожайности по годам является случайным. Следовательно, адекватно он должен характеризоваться не только своими величинами, но и вероятностями их появления. На основании многолетних данных об урожаях были построены дифференциальные кривые распределения вероятностей, по которым и были определены вероятности появления урожаев в диапазоне: $\leq 1,0$ т/га (низкий урожай) и $\geq 2,5$ т/га (высокий урожай). Картирование этих показателей дает более правильную характеристику зоны, включающую не только абсолютные величины, но и вероятность их появления (рис. 6 и 7).

На востоке Ставропольского края, Ростовской области, в Поволжье (южнее Хвалынска Саратовской области) вероятность получения урожая $\leq 1,0$ т/га составляет 50—80 %, вероятность высоких урожаев ($\geq 2,5$ т/га) чрезвычайно мала (до 5 %). Такие же условия наблюдаются в Казахстане к югу от линии Уральск, Актюбинск, Есиль, Целиноград, Краснокутск (Павлодарская область) и Родино (Алтайский край).

В южной части центрально-черноземной зоны (южнее Курска и Воронежа), в большинстве районов Поволжья, на севере Актюбинской и Кустанайской областей, на востоке Кокчетавской и на юге Омской и Новосибирской областей, на большей части Алтайского края и в восточных областях Казахстана вероятность низких ($\leq 1,0$ т/га) урожаев 25—40 %, т. е. в 3—4 годах из 10. В 5—10 % лет в этих районах можно получить урожай 2,5 т/га и более.

К северу и востоку от линии, проходящей через Курск, Воронеж, Тамбов, Пензу, Куйбышев, Уфу, Петропавловск, Новосибирск, Барнаул, вероятность низких урожаев ($\leq 1,0$ т/га) уменьшается до 10—20%, а вероятность урожаев $\geq 2,5$ т/га увеличивается до 20—30 % (в 2—3 годах из 10). В этих районах чаще наблюдается хорошее увлажнение. Однако на большей части земледельческой зоны Западной Сибири при этих условиях увеличивается вероятность повреждения невызревшей яровой пшеницы заморозками (примерно 1—2 раза в 10 лет).

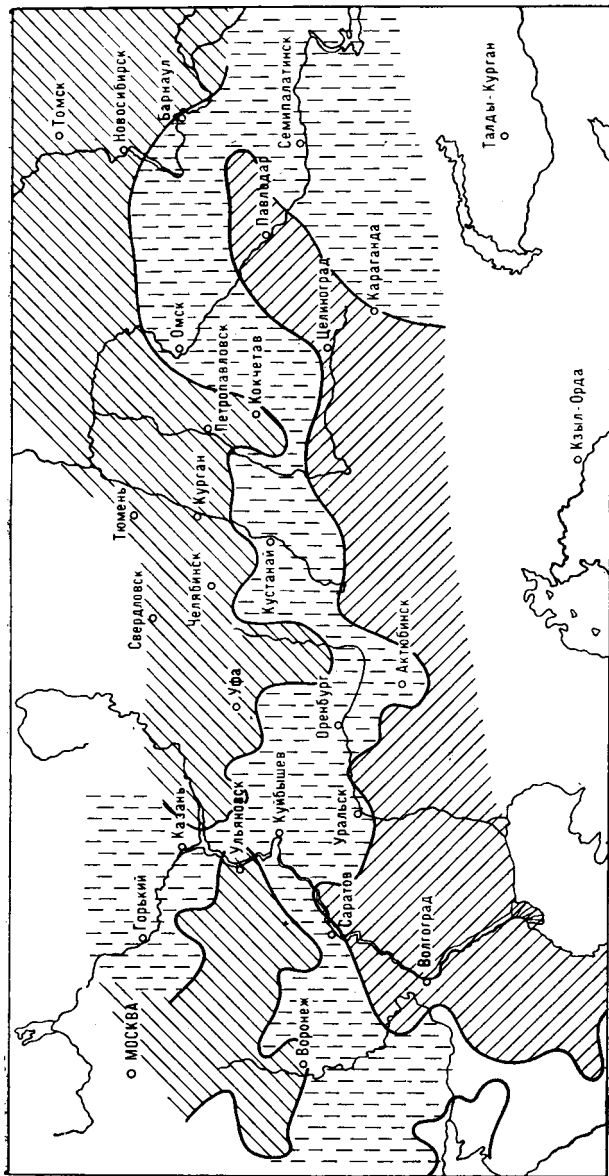


Рис. 6. Вероятность получения урожая стандартных соргов яровой пшеницы менее 10 т/га.
 1) < 25 %; 2) 25–50 %; 3) > 50 %.

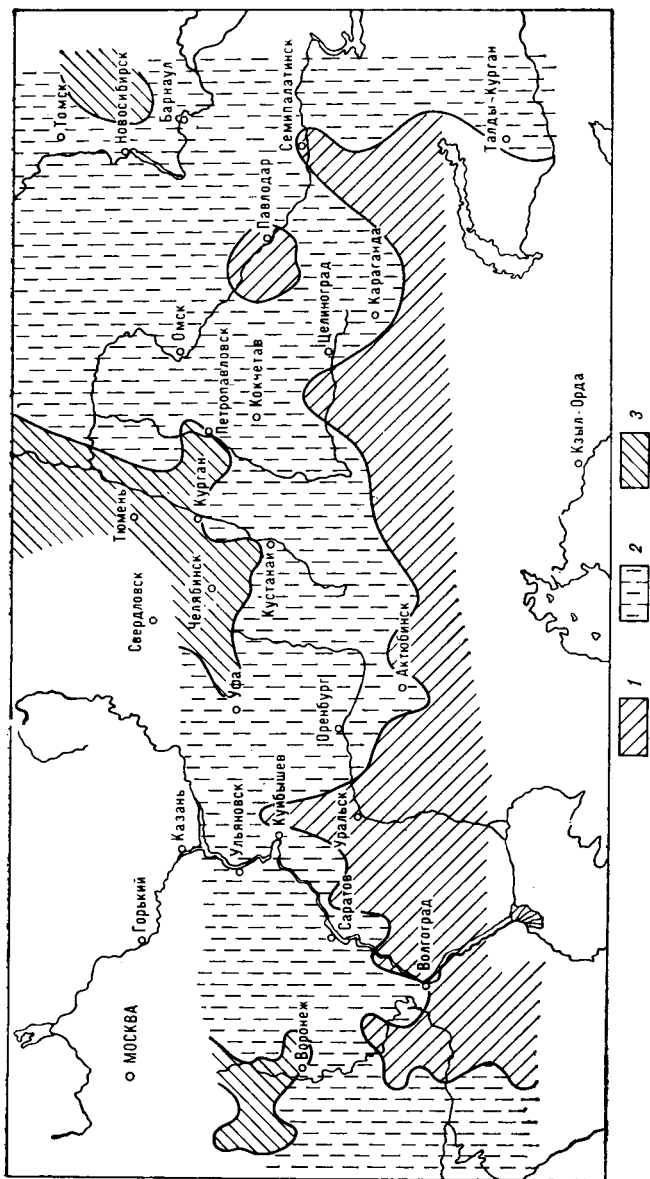


Рис. 7. Вероятность получения урожая стандартных сортов яровой пшеницы более 2,5 т/га.
 1) 0 %; 2) 1—25 %; 3) >25 %.

3.1.2. Связь урожаев на госсортоучастках с хозяйственными урожаями

Для того чтобы учесть реальные хозяйственные и организационные факторы процессов получения урожая, можно сравнить урожаи, получаемые в системе госсортосети при постоянной высокой агротехнике, со средними областными урожаями. В качестве исходных данных мы использовали средние по области урожаи с госсортоучастков и сопоставили их со средними областными урожаями за 1961—1970 гг.

Полагая, что связь между этими величинами линейная, мы нашли уравнения регрессии по областям (табл. 4). Из данных табл. 4 видно, что эта связь довольно тесная. Коэффициент корреляции составляет 0,80—0,97. Хозяйственный урожай яровой пшеницы равен примерно 0,55—0,80 от урожаев, полученных на госсортоучастках. В среднем для областей Западной Сибири и Казахстана за последние 10 лет уравнение регрессии будет следующим:

$$U_{\text{цсy}} = 0,635U_{\text{гсy}} + 0,175.$$

Коэффициент регрессии между областными урожаями на ГСУ и хозяйственными урожаями дают возможность оценить близость агротехники на госсортоучастках и в хозяйствах.

Как было показано выше, на территории Западной Сибири и Казахстана урожаи при постоянной высокой агротехнике (ГСУ) в 1,5—2 раза выше, чем урожаи хозяйственные. В этом плане интересно проанализировать ход коэффициента регрессии по годам. С этой целью были найдены уравнения регрессии для каждого года за 1961—1970 гг. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Анализ этой таблицы показывает, что отношение урожаев, полученных при высокой агротехнике в данных районах по годам, к хозяйственным урожаям составляет 1,6—2,2.

Среднее за пятилетку (1961—1965 гг.) отношение урожаев $U_{\text{гсy}}/U_{\text{цсy}}=2,1$. Это же отношение в следующую пятилетку (1966—1970 гг.) уменьшается до $U_{\text{гсy}}/U_{\text{цсy}}=1,6$, т. е. уровень агротехники в хозяйствах стал более высоким. Однако значительный разрыв в агротехнике еще сохраняется. Можно полагать, что при развитии орошения и, следовательно, при более высокой агротехнике хозяйственные урожаи со временем сравняются с урожаями на госсортоучастках.

Известно, что урожай зависит не только от среднего уровня агротехники возделывания сельскохозяйственных культур, но и от своевременности применения агротехнического приема. Для расчета диапазонов регулирования водного режима также

Таблица 4

Зависимость среднего областного урожая яровой пшеницы (по данным ЦСУ) от среднего по области урожая, полученного на госсортоучастках

Область (край)	\bar{U} т/га		$\sigma \cdot 10^{-1}$ т/га		r	Уравнение регрессии
	ГСУ	ЦСУ	ГСУ	ЦСУ		
Курганская	2,28	1,36	6,43	3,87	0,98	$U_{\text{цсу}} = (0,560U_{\text{гсу}} + 0,83) \cdot 10^{-1}$
Оренбургская	1,28	1,00	5,25	4,12	0,97	$U_{\text{цсу}} = (0,761U_{\text{гсу}} + 0,26) \cdot 10^{-1}$
Тюменская	1,91	1,08	5,32	3,36	0,96	$U_{\text{цсу}} = (0,607U_{\text{гсу}} - 0,79) \cdot 10^{-1}$
Челябинская	2,01	1,24	5,23	4,58	0,97	$U_{\text{цсу}} = (0,805U_{\text{гсу}} - 3,78) \cdot 10^{-1}$
Алтайский	1,32	0,87	5,78	3,09	0,97	$U_{\text{цсу}} = (0,519U_{\text{гсу}} + 1,85) \cdot 10^{-1}$
Кемеровская	1,84	1,15	6,29	4,76	0,95	$U_{\text{цсу}} = (0,719U_{\text{гсу}} - 1,73) \cdot 10^{-1}$
Новосибирская	1,36	0,75	5,51	2,76	0,87	$U_{\text{цсу}} = (0,436U_{\text{гсу}} + 1,57) \cdot 10^{-1}$
Омская	1,32	0,84	8,37	5,28	0,94	$U_{\text{цсу}} = (0,604U_{\text{гсу}} + 0,43) \cdot 10^{-1}$
Томская	2,04	1,24	5,43	4,56	0,91	$U_{\text{цсу}} = (0,764U_{\text{гсу}} - 3,18) \cdot 10^{-1}$
Красноярский	1,87	1,13	5,17	3,80	0,97	$U_{\text{цсу}} = (0,713U_{\text{гсу}} - 2,03) \cdot 10^{-1}$
Актюбинская	0,95	0,64	4,42	3,28	0,97	$U_{\text{цсу}} = (0,720U_{\text{гсу}} - 0,44) \cdot 10^{-1}$
Алма-Атнская	1,37	0,88	4,40	2,92	0,81	$U_{\text{цсу}} = (0,538U_{\text{гсу}} + 1,43) \cdot 10^{-1}$
Восточно-Казахстанская	1,50	1,01	4,54	3,33	0,95	$U_{\text{цсу}} = (0,696U_{\text{гсу}} - 0,34) \cdot 10^{-1}$
Джамбульская	1,11	0,71	3,36	2,55	0,80	$U_{\text{цсу}} = (0,621U_{\text{гсу}} + 0,21) \cdot 10^{-1}$
Карагиндская	0,73	0,48	3,75	2,50	0,96	$U_{\text{цсу}} = (0,640U_{\text{гсу}} + 0,13) \cdot 10^{-1}$
Кокчетавская	1,04	0,78	4,50	3,20	0,94	$U_{\text{цсу}} = (0,668U_{\text{гсу}} + 0,85) \cdot 10^{-1}$
Кустанайская	1,30	0,84	5,12	3,43	0,93	$U_{\text{цсу}} = (0,628U_{\text{гсу}} + 0,80) \cdot 10^{-1}$
Павлодарская	0,55	0,42	2,50	2,18	0,87	$U_{\text{цсу}} = (0,759U_{\text{гсу}} + 0,04) \cdot 10^{-1}$
Северо-Казахстанская	1,41	1,06	5,92	3,98	0,86	$U_{\text{цсу}} = (0,585U_{\text{гсу}} + 2,35) \cdot 10^{-1}$
Семипалатинская	0,85	1,62	3,53	2,15	0,91	$U_{\text{цсу}} = (0,554U_{\text{гсу}} + 1,49) \cdot 10^{-1}$
Уральская	1,17	0,90	6,03	4,83	0,98	$U_{\text{цсу}} = (0,758U_{\text{гсу}} - 0,18) \cdot 10^{-1}$
Целиноградская	0,99	0,70	4,62	2,99	0,95	$U_{\text{цсу}} = (0,615U_{\text{гсу}} + 1,16) \cdot 10^{-1}$

Таблица 5

Зависимость среднего областного урожая яровой пшеницы
(по данным ЦСУ) от среднего урожая,
полученного на госсортоучастках (по годам)

Год	U т/га		$\sigma \cdot 10^{-1}$ т/га		r	Уравнение регрессии
	ГСУ	ЦСУ	ГСУ	ЦСУ	ГСУ— ЦСУ	
1961	1,32	0,82	5,18	2,83	0,79	$U_{цсу} = (0,43U_{гсу} + 2,52) \cdot 10^{-1}$
1962	1,26	0,79	3,89	2,36	0,80	$U_{цсу} = (0,47U_{гсу} + 1,98) \cdot 10^{-1}$
1963	0,90	0,58	4,80	2,80	0,91	$U_{цсу} = (0,53U_{гсу} + 1,03) \cdot 10^{-1}$
1964	1,46	0,93	3,28	1,84	0,82	$U_{цсу} = (0,46U_{гсу} + 2,58) \cdot 10^{-1}$
1965	0,81	0,46	4,19	2,12	0,90	$U_{цсу} = (0,45U_{гсу} + 0,91) \cdot 10^{-1}$
1966	1,58	1,09	7,37	5,13	0,93	$U_{цсу} = (0,61U_{гсу} + 1,33) \cdot 10^{-1}$
1967	1,28	0,87	7,88	5,29	0,95	$U_{цсу} = (0,62U_{гсу} + 0,71) \cdot 10^{-1}$
1968	1,65	1,14	7,43	5,07	0,94	$U_{цсу} = (0,64U_{гсу} + 0,82) \cdot 10^{-1}$
1969	1,35	0,91	6,19	3,19	0,93	$U_{цсу} = (0,48U_{гсу} + 2,83) \cdot 10^{-1}$
1970	1,81	1,11	5,75	3,37	0,91	$U_{цсу} = (0,53U_{гсу} + 1,45) \cdot 10^{-1}$

необходимы детальные данные по фазам развития определенной сельскохозяйственной культуры на рассматриваемой территории.

3.1.3. Анализ многолетних данных по фазам развития яровой пшеницы

Анализ и интерпретацию диапазонов регулирования водного режима невозможно провести без учета фаз развития растения. Это вызвано тем, что растение в каждую фазу в зависимости от биологического состояния имеет свои специфические требования [14]. Более того, в зависимости от предыстории развития растения календарные сроки наступления отдельных фаз могут сдвигаться в значительных пределах. Для целей настоящей работы достаточно было проанализировать данные многолетних наблюдений по фазам развития яровой пшеницы на рассматриваемой территории по следующим пунктам: Комсомolec, Шадринск, Тара, Черлак, Новосибирск, Михайловка, Ключи, Шортанды, Ишим, Тобольск, Мартук и Оренбург и построить осредненные по всем пунктам кривые распределения дат наступления отдельных фаз, представленные на рис. 8.

Предварительные расчеты показали, что вероятность наступления фаз развития растения связана с величиной урожая. Так, отмечено, что высокие урожаи обычно получаются при более продолжительном вегетационном периоде. Следовательно, более высокая обеспеченность фазы будет соответствовать более вы-

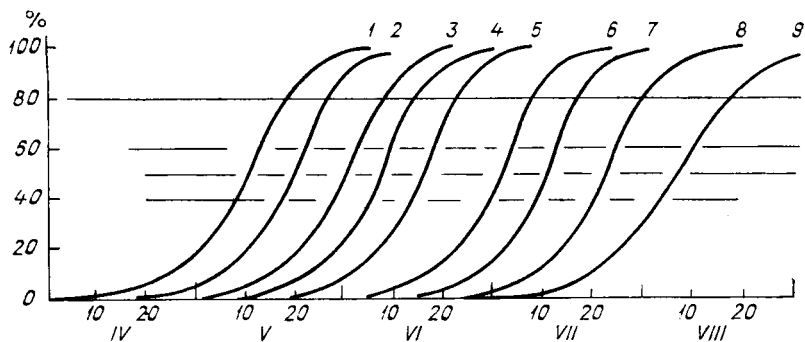


Рис. 8. Осредненные кривые распределения вероятности дат наступления фаз развития яровой пшеницы (для 12 станций Западной Сибири и Казахстана).

1 — посев, 2 — всходы, 3 — 3-й лист, 4 — кушение, 5 — выход в трубку, 6 — колошение, 7 — цветение, 8 — молочная спелость, 9 — восковая спелость.

сокому урожаю. Это обстоятельство использовано в дальнейшем при установлении интервалов регулирования для урожаев различной обеспеченности.

3.1.4. Интегральные вероятности распределения урожайностей

Итоговой характеристикой изменения урожаев в различные годы являются интегральные кривые распределения вероятностей. Расчетами было показано, что изменение урожаев является случайным гармоническим процессом, который в первом приближении можно считать стационарным. Автокорреляционные функции этого процесса показали, что в нем имеет место периодическая составляющая с $\tau = 2,5 \div 3,5$ года.

Следует отметить, что рассмотрению подлежали данные урожаев, полученные только на госсортоучастках, т. е. урожаев, выращенных при высокой и постоянной агротехнике. Хозяйственные урожаи имеют тенденцию к росту, поэтому процесс изменения хозяйственных урожаев по годам нельзя считать стационарным.

Таким образом, с учетом квазистационарности процесса изменения урожаев на ГСУ, были получены кривые распределения вероятностей. Эти кривые в основном симметричны или имеют весьма слабую асимметрию.

Представляется, что необходима дальнейшая более глубокая проработка вопроса об интегральных кривых распределения урожаев и о характере их изменения по территории СССР не только в естественных условиях, но и в условиях мелиораций.

Для практического использования в дальнейшем данные об урожаях некоторых фиксированных обеспеченностей U_{90} %, U_{75} %, U_{50} %, U_{25} %, U_{10} % сведены в табл. 6. Здесь же приведены конкретные годы, в которые урожай был близок к урожаю заданий обеспеченности.

3.2. Анализ условий произрастания яровой пшеницы

Выше была дана краткая климатическая характеристика рассматриваемого района. Проанализируем отдельные факторы среды, которые существенно влияют на формирование урожая.

3.2.1. Повреждение растений весенними и осенними заморозками

Для районов Сибири и Казахстана характерно быстрое нарастание тепла весной, сопровождающееся возвратами холодов. Однако, по литературным данным [4], яровая пшеница в фазе формирования листового аппарата (всходы) относится к группе холодостойких растений и выдерживает весенние заморозки до -7 , -8°C на уровне листовой поверхности. Начало повреждений и частичная гибель начинается при температуре -9 , -10°C . В Западной Сибири вероятность повреждений всходов яровой пшеницы заморозками составляет около 10% (для ровного места) и примерно 30 % в морозобойных местах (пади, мелкие долины). Таким образом, яровая пшеница на территории Западной Сибири и Казахстана почти не повреждается весенними заморозками [19].

Значительно больше вреда приносят осенние заморозки, которые повреждают не вполне зрелое зерно яровой пшеницы. В результате получается «зяблое» и мелкое зерно с низкими хлебопекарными качествами. Однако, как показывает анализ сроков созревания яровой пшеницы и средних дат заморозков, в этот период повреждение зерна в фазе молочно-восковой спелости может наблюдаться не более 2—3 раз в 10 лет.

3.2.2. Режим влажности почвы под яровой пшеницей

Для анализа режима влажности почвы прежде всего необходимо проанализировать данные о почвенно-гидрологических условиях.

По почвенным условиям в Западной Сибири выделяется таежно-болотно-лесная провинция с дерново-подзолистыми суглинистыми почвами. В междуречьях сконцентрированы

Таблица 6

Урожай яровой пшеницы (по данным ГСУ) различной вероятности (т/га)

Станция, ГСУ	Вероятность урожаев по годам									
	год	90 %	год	75 %	год	50 %	год	25 %	год	10 %
Карабалыкский ГСУ	1962	2,42	1969	2,01	1960	1,54	1948	1,08	1963	0,93
		<u>2,24</u>		<u>2,06</u>		<u>1,95</u>		<u>0,92</u>		<u>0,67</u>
Комсомолец		2,45		2,00		1,45		1,00		0,65
Шадринский ГСУ	1969	3,41	1970	3,56	1965	2,60	1957	1,92	1952	1,03
		<u>4,07</u>		<u>3,08</u>		<u>2,06</u>		<u>1,34</u>		<u>0,96</u>
Шадринск		3,40		3,15		2,55		1,75		1,20
Новосибирский ГСУ	1957	2,80	1970	2,27	1967	1,80	1969	1,19	1965	0,60
		<u>2,73</u>		<u>2,61</u>		<u>1,50</u>		—		<u>0,52</u>
Новосибирск		2,90		2,35		1,75		1,20		0,60
Шортандинский ГСУ	1969	2,41	1966	1,93	1959	1,44	1960	1,04	—	—
		<u>2,69</u>		<u>2,15</u>		<u>1,38</u>		<u>1,44</u>		—
Шортанды		2,45		2,00		1,45		1,00		0,65
Ишимский ГСУ	1966	3,20	1960	3,05	1948	1,73	1963	1,07	1951	0,68
		<u>1,37</u>		<u>0,60</u>						
Ишим		3,10		2,80		1,60		1,15		0,80
Черлакский ГСУ	1964	3,29	1970	2,41	—	—	1968	1,26	1969	0,39
		<u>3,25</u>		<u>2,45</u>		<u>1,65</u>		<u>0,95</u>		<u>0,60</u>
Черлак		3,25		2,45		1,65		0,95		0,60
Мартукский ГСУ	1970	2,67	1959	1,88	1961	1,28	1951	0,66	1967	0,09
		<u>2,50</u>		<u>1,16</u>		<u>0,34</u>		<u>0,09</u>		
Мартук		2,65		1,80		1,25		0,65		0,35
Тобольский ГСУ	1966	3,30	1967	2,58	1950	2,15	1965	1,60	1950	0,60
		<u>3,20</u>		<u>2,70</u>		<u>2,15</u>		<u>1,70</u>		<u>1,00</u>
Тобольск		3,20		2,70		2,15		1,70		1,00
Тарский ГСУ	1970	2,91	1969	2,54	1966	2,12	1958	1,53	1963	0,89
Тара		2,75		2,35		2,00		1,50		1,05
Саракташский ГСУ	1969	2,67	1953	2,22	1959	1,34	1965	0,90	1967	0,30
		<u>1,83</u>		<u>0,96</u>		<u>0,80</u>		<u>0,06</u>		
Оренбург		2,70		2,05		1,20		0,70		0,45
Михайловский ГСУ	1951	2,78	1966	1,74	1970	2,03	1955	0,91	1965	0,73
		<u>3,03</u>		<u>1,14</u>		<u>2,09</u>		<u>0,86</u>		<u>0,36</u>
Ключи		2,50		1,75		1,05		0,85		0,50
Урлютюпский ГСУ	1968	1,76	1959	1,41	1961	1,12	1970	0,59	1969	0,48
		<u>1,34</u>		<u>1,12</u>		<u>0,73</u>		<u>0,39</u>		<u>0,24</u>
Михайловка		1,90		1,35		1,15		0,55		0,35

Примечание. В числителе дроби приведены урожаи пшеницы мягких сортов, в знаменателе — твердых.

слабодренированные подзолисто-болотные и торфяно-болотные почвы. Примерно, с 57° с. ш. подзолистые почвы сменяются солонцеватыми лугово-черноземными и черноземными почвами различного механического состава. На большей части Казахстана и в западных районах Алтайского края преобладают каштановые почвы.

Почвенно-гидрологические характеристики, которые использовались при расчете запасов влаги, приведены в табл. 7 [9, 21, 25].

Для оценки условий произрастания яровой пшеницы были проанализированы запасы продуктивной влаги в почве за 1945—1970 гг. Для удобства анализа средних многолетних запасов продуктивной влаги все имеющиеся материалы были разделены на две группы: материалы станций зон с достаточным и недостаточным увлажнением.

В группу станций, расположенных в зоне достаточного увлажнения, вошли следующие: Тобольск и Ишим (Тюменская область), Тара (Омская область), Шадринск (Курганская область) и Новосибирск. По Д. И. Шашко [27], эти станции размещаются во влажной и полувлажной зонах.

В группу станций с недостаточным увлажнением отнесены следующие: Оренбург, Мартук (Актюбинская область), Комсомолец (Кустанайская область), Черлак (Омская область), Михайловка (Павлодарская область), Шортанды (Целиноградская область), Ключи (Алтайский край). По Д. И. Шашко, эти станции входят в полузасушливую и засушливую зоны.

Анализ средних многолетних запасов продуктивной влаги на территории Западной Сибири и Казахстана проводился по слоям 0—20, 0—50 и 0—100 см.

На первых этапах развития яровой пшеницы (от посева до кущения) для растений большое значение имеют запасы влаги пахотного слоя (0—20 см). К посеву яровой пшеницы в этом слое средние запасы продуктивной влаги в районах Западной Сибири с достаточным увлажнением составляют 40—45 мм (коэффициент вариации $C_v \approx 30\%$). В полузасушливых и засушливых районах Западной Сибири и Казахстана эти запасы составляют 25—30 мм ($C_v = 30 \div 40\%$); на супесчаных почвах этой зоны— 15—20 мм.

К моменту формирования листового аппарата яровой пшеницы (кущение — выход в трубку) средние многолетние запасы продуктивной влаги значительно снижаются: до 25—30 мм в районах с достаточным увлажнением и до 10—15 мм в засушливых и полузасушливых районах (на легких почвах засушливой зоны они составляют менее 10 мм).

С уменьшением общих влагозапасов в почве пестрота запасов увеличивается, увеличивается и коэффициент вариации (до 40—70% в зоне с достаточным увлажнением и до 80—120% в засушливой зоне).

К концу роста листового аппарата и в начале развития генеративных органов (с начала июля) запасы влаги пахотного слоя уменьшаются примерно до 20 мм. В зоне недостаточного увлажнения в этот период запасы влаги уменьшаются до 10—15 мм (на супесчаных почвах до 5—8 мм). Такие запасы влаги в пахотном слое остаются почти без изменений до конца вегетации.

С момента кущения начинается рост узловых корней яровой пшеницы. При выходе в трубку яровая пшеница использует главным образом влагу полуметрового слоя. К посеву яровой пшеницы в верхнем полуметровом слое почвы в районах Западной Сибири с достаточным увлажнением содержится в среднем 80—110 мм продуктивной влаги; к выходу в трубку за счет расхода из пахотного слоя запасы уменьшаются до 60—80 мм при коэффициенте вариации 30—60 %.

В районах с недостаточным увлажнением запасы влаги полуметрового слоя к посеву в среднем составляют 70—80 мм на суглинистых почвах и 50—60 мм на супесчаных.

Завязывание и налив зерна яровой пшеницы проходит в условиях, когда в полуметровом слое почвы запасы влаги резко снижаются: в районах с достаточным увлажнением до 30—50 мм, в засушливых и полузасушливых до 25—35 мм (на легких почвах этой зоны до 10—20 мм). При формировании урожая яровой пшеницы (цветение — молочная спелость) запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы почти не изменяются.

Таким образом, формирование урожая яровой пшеницы происходит за счет использования влаги всего метрового слоя почвы. Это особенно заметно в степной зоне Западной Сибири и Казахстана. По литературным данным [17], в острозасушливые годы используется влага из нижележащих горизонтов. Поэтому в дальнейшем основное внимание было уделено анализу процессов, происходящих в метровом слое, хотя и были сделаны расчеты, позволяющие учитывать переменность слоя во времени.

К моменту посева яровой пшеницы средние многолетние запасы метрового слоя в зоне достаточного увлажнения составляют 120—180 мм продуктивной влаги (наиболее благоприятными [13] считаются условия, когда в суглинистой почве содержится 170—190 мм влаги). В засушливой зоне запасы продуктивной влаги к посеву яровой пшеницы обычно составляют 100—140 мм на суглинистых почвах и 80—100 мм на легких супесчаных почвах (оптимальными запасами на супесчаных почвах можно считать 450—170 мм). Поэтому при посеве яровой пшеницы недостаток влаги в метровом слое почвы составляет в среднем 50—70 мм.

В начале роста листового аппарата яровой пшеницы в зоне достаточного увлажнения в метровом слое почвы содержится

Таблица 7

Агрогидрологические свойства почвы

Станция	№ разреза	Тип почвы	Непродуктивная влага (мм) в слое, см			Наименьшая влагосодержательность (мм продуктивной влаги) в слое, см			Полная влагосодержательность (мм продуктивной влаги) в слое, см		
			0-20	0-50	0-100	0-20	0-50	0-100	0-20	0-50	0-100
Комсомолец, Кустанайская область	169	Чернозем обыкновенный, гумусный среднесуглинистый	28	77	167	44	98	179	—	—	—
	2	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый	40	101	196	—	—	—	—	—	—
	3	Чернозем выщелоченный легкосуглинистый	50	114	225	—	—	—	—	—	—
	4	Чернозем сильновыщелоченный среднесуглинистый	23	60	133	39	85	152	80	189	335
	5	Чернозем выщелоченный среднесуглинистый	32	35	161	—	—	—	—	—	—
	6	Чернозем выщелоченный среднесуглинистый среднемошный	23	62	111	—	—	—	93	191	333
Новосибирск (Огурцово)	34	Чернозем выщелоченный среднемошный суглинистый	16	47	90	49	110	200	110	241	453
	35	Чернозем выщелоченный среднемошный суглинистый	16	41	67	46	111	224	79	187	370
	663	Чернозем выщелоченный легкосуглинистый	24	58	102	35	73	131	—	—	—
Шортланды, Целиноградская область	239	Чернозем карбонатный малогумусный тяжелосуглинистый	26	71	153	40	89	164	99	220	374
	1	Чернозем выщелоченный суглинистый	25	63	129	47	101	165	90	196	342

2	Чернозем выщелоченный суглинистый	22	65	130	34	85	152	100	207	367
3	Чернозем выщелоченный суглинистый	25	64	123	27	68	126	96	217	394
1	Чернозем обыкновенный легкосуглинистый	19	49	85	26	55	144	91	200	375
2	Чернозем обыкновенный легкосуглинистый	15	38	73	25	49	126	99	224	410
125	Чернозем южный среднесуглинистый	19	45	94	48	114	195	106	244	432
126	Чернозем южный супесчаный	9	21	52	18	49	111	93	226	415
1	Аллювиальная дерново-подзолистая тяжелосуглинистая	28	84	199	45	96	141	93	197	331
2	Аллювиальная дерново-подзолистая суглинистая	17	55	148	38	93	168	108	236	383
3	Дерново-подзолистая суглинистая	23	61	156	52	122	187	92	199	329
1	Дерново-подзолистая оглеенная легкосуглинистая	22	72	167	56	105	176	103	181	309
2	Дерново-подзолистая легкосуглинистая	—	—	—	—	—	—	—	—	—
213	Слабосолонцеватый южный чернозем	30	69	129	28	78	160	—	—	—
93	Чернозем южный легкосуглинистый	12	33	67 ¹	—	—	—	85	185	345
248	Чернозем малогумусный супесчаный	13	37	65	—	—	—	—	—	—
249	Чернозем южный легкосуглинистый	12	28	51	42	92	170	—	—	—

¹ Непродуктивная влага вычислена по формуле (максимальная гигроскопичность×1,37).

Таблица 8

Средние многолетние запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см (мм и

Станция, область	Число лет	Признак	Апрель			Май		
			1	2	3	1	2	3
Комсомолец, Кустанайская область	22	w мм	—	49	40	35	33	29
		w %		48	39	34	32	28
		σ_w %		23	17	12	11	12
Шадринск, Курганская область	26	w мм	—	—	40	39	36	44
		w %			40	39	36	34
		σ_w %			14	10	10	10
Новосибирск (Огурцово)	25	w мм	—	53	44	43	39	35
		w %		56	47	46	41	37
		σ_w %		52	41	17	11	10
Шортанды, Целиноградская область	13	w мм	—	33	34	30	30	26
		w %		33	34	30	30	26
		σ_w %		8	9	11	9	10
Ишим, Тюменская область	23	w мм				29	32	32
		w %				30	34	34
		σ_w %	—	—	—	21	14	14
Черлак, Омская область	21	w мм			24	20	22	16
		w %		—	25	21	23	17
		σ_w %			9	7	11	6
Мартук, Актюбинская область ¹	22	w мм		17	12	22	17	14
		w %	—	17	12	22	17	14
		σ_w %		18	8	14	13	15
Тобольск, Тюменская область	26	w мм			42	44	41	37
		w %			44	46	43	38
		σ_w %	—		15	9	12	12
Тара, Омская область	24	w мм		42	45	42	38	34
		w %			43	40	36	33
		σ_w %			8	14	8	11
Оренбург	23	w мм	21	30	30	28	29	20
		w %			29	28	28	19
		σ_w %			7	9	10	10
Ключи, Алтайский край	26	w мм	—	23	21	20	20	17
		w %			25	24	24	20
		σ_w %			7	6	5	9
Михайловка, Павлодарская область	20	w мм	38	34	26	24	22	18
		w %			26	24	22	18
		σ_w %			8	5	6	6

% от полной влагоемкости) под яровой пшеницей

Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
31	23	18	20	17	18	14	15	19	18	30	20
30	22	18	20	17	18	14	15	19	18	20	20
15	13	12	15	14	15	13	15	18	18	14	15
34	25	21	22	21	18	18	19	17	22	23	18
34	25	21	22	21	18	18	19	17	22	23	18
8	9	10	13	13	16	12	13	13	17	13	10
35	30	22	19	17	20	21	24	24	29	31	40
37	32	23	20	18	21	22	26	26	31	33	42
13	12	17	15	14	16	16	17	15	13	16	29
25	25	20	23	24	19	17	15	15	13	14	13
10	11	11	16	18	16	15	14	13	10	8	9
28	20	20	16	17	16	18	22	26	26	—	—
29	21	21	17	18	17	19	23	27	27	—	—
15	14	18	16	12	14	16	16	15	13	—	—
14	11	8	7	4	5	7	8	9	9	9	11
15	12	8	7	4	5	7	9	9	9	9	12
8	8	8	8	5	10	9	7	7	7	8	9
14	8	7	7	6	2	3	4	8	5	7	6
14	10	9	11	7	3	3	4	13	5	7	5
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
34	31	24	21	22	20	18	22	27	32	41	40
35	32	25	22	23	21	19	23	28	33	43	42
12	12	13	16	17	15	15	18	17	14	11	13
32	30	22	21	19	18	16	15	18	29	37	32
31	29	21	20	18	17	15	14	17	28	36	31
11	12	13	16	15	13	13	11	12	11	12	11
14	7	6	6	5	7	7	10	—	—	—	—
14	7	6	6	5	7	7	10	—	—	—	—
10	7	8	7	6	8	9	9	—	—	—	—
12	10	8	7	6	8	8	7	7	9	8	10
14	12	9	8	7	10	9	8	8	10	9	12
7	9	10	9	8	9	6	7	6	8	7	5
20	16	13	15	10	16	13	12	12	14	11	12
21	16	13	15	10	16	13	12	12	14	11	12
9	10	7	12	7	13	10	9	10	10	9	8

Таблица 9

Средние многолетние запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы

Станция, область	Число лет	Признак	Апрель			Май		
			1	2	3	1	2	3
Комсомолец, Кустанайская область	22	w мм		110	97	84	75	71
		w %	—	49	43	37	33	32
		σ_w %		26	21	15	13	14
Шадринск, Курганская область	26	w мм	—		83	78	71	68
		w %		—	40	38	34	33
		σ_w %			14	10	9	10
Новосибирск (Огурцово)	25	w мм		118	120	96	87	88
		w %		55	56	45	40	41
		σ_w %	—	31	16	11	11	И
Шортанды, Целиноградская область	13	w мм			73	67	66	64
		w %	=	—	33	30	30	29
		σ_w %			9	9	8	7
Ишим, Тюменская область	23	w мм			56	52	76	72
		w %	—	—	28	26	38	36
		σ_w %			17	13	13	11
Черлак, Омская область	21	w мм			50	43	45	36
		w %		г	24	20	21	17
		σ_w %			9	8	12	7
Мартук, Актюбинская область	22	w мм		43	34	54	46	41
		w %		18	15	23	20	17
		σ_w %	—	16	8	13	13	10
Тобольск, Тюменская область	26	w мм			95	102	94	89
		W %		—	45	48	45	42
		σ_w %			15	10	12	11
Тара, Омская область	23	w мм		—	99	78	86	81
		$w \sigma_w$	—		49	39	42	40
		σ_w %			7	15	6	8
Ключи, Алтайский край	26	w мм		54	53	50	51	47
		w %	—	29	29	27	28	25
		σ_w %		10	7	7	6	7
Михайловка, Павлодарская область	20	w мм	78	70	62	56	51	46
		w %	39	35	31	28	25	23
		σ_w %	15	13	10	5	6	7
Оренбург	23	w мм		71	78	74	75	59
		w %	—	33	37	35	35	28
		σ_w %		15	12	10	10	И

(мм и % от полной влагоемкости) под яровой пшеницей

Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
72	56	48	47	42	40	33	31	40	36	39	42
32	25	21	21	19	18	15	14	18	16	17	19
15	13	13	17	15	15	14	16	17	15	14	15
68	56	44	40	38	30	30	32	39	40	44	42
33	27	21	19	18	15	15	16	18	19	21	20
11	11	10	12	11	14	11	13	15	19	14	14
79	73	54	42	34	37	37	43	42	51	64	83
37	34	25	20	16	17	17	20	20	24	30	39
12	11	15	13	12	13	12	14	13	12	15	16
62	56	48	48	48	42	35	36	33	28	30	25
28	25	22	22	22	19	16	16	15	13	14	11
9	10	10	12	16	15	14	12	13	12	9	10
67	50	48	40	37	34	39	42	52	58	54	—
33	25	24	20	18	17	19	21	26	29	27	—
15	12	15	15	12	14	15	17	14	14	6	—
31	26	20	14	7	8	12	13	16	17	17	18
15	12	9	7	3	4	6	6	8	8	8	9
8	7	8	7	4	8	8	7	7	6	7	8
37	29	23	21	18	11	15	15	24	17	24	20
16	12	10	9	8	5	6	6	10	7	10	9
8	10	8	9	8	4	6	5	14	7	8	6
82	79	64	53	51	43	47	48	54	—	84	99
39	37	30	25	24	23	22	23	26	33	40	47
12	11	11	13	13	13	13	12	16	13	10	15
76	71	66	55	48	44	39	36	42	60	74	51
38	35	33	27	24	22	19	18	21	30	37	25
10	10	10	16	15	13	12	12	15	15	17	4
37	30	21	12	15	17	15	15	16	17	18	22
20	16	11	6	8	9	8	8	9	9	10	12
7	9	9	8	7	8	5	7	5	6	6	4
51	45	35	36	28	34	29	28	24	30	25	25
25	22	17	18	14	17	14	14	12	15	12	12
9	9	7	11	9	12	10	10	8	9	8	7
46	28	16	15	12	16	14	16	—	—	—	—
22	13	8	7	6	8	7	8	—	—	—	—
10	8	6	5	5	6	7	8	—	—	—	—

Таблица 10

Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (мм и

Станция, область	Число лет	Признак	Апрель			Май		
			1	2	3	1	2	3
Комсомолец, Кустанайская область	22	w мм	—	—	162	141	128	125
		w %	—	—	41	35	32	31
		σ_w %	—	—	24	15	14	- 15
Шадринск, Курганская область	26	w мм	—	—	147	125	112	105
		w %	—	—	38	32	29	27
		σ_w %	—	—	12	И	10	И
Новосибирск (Огурцово)	25	w мм	—	—	—	140	132	134
		w %	—	—	—	34	32	32
		σ_w %	—	—	—	8	11	10
Шортанды, Челябинградская область	13	w мм	—	—	124	123	117	115
		w %	—	—	33	33	31	31
		σ_w %	—	—	9	У	7	0
Ишим, Тюменская область	23	w мм	—	—	—	97	131	123
		w %	—	—	—	28	37	35
		σ_w %	—	—	—	18	15	14
Черлак, Омская область	21	w мм	—	—	94	82	78	75
		w %	—	—	24	21	20	19
		σ_w %	—	—	12	8	13	8
Мартук, Актыобинская область	22	w мм	—	65	60	96	81	80
		w °О	—	15	14	23	19	19
		σ_w %	—	13	7	И	10	12
Тобольск, Тюменская область	22	w мм	—	—	163	178	167	164
		w %	—	—	47	51	48	48
		%	—	—	13	10	10	9
Тара, Омская область	24	w мм	—	—	152	140	137	133
		w %	—	—	44	41	40	39
		σ_w %	—	—	7	И	7	10
Оренбург	23	w мм	—	129	133	144	144	124
		w %	—	—	36	39	39	34
		σ_w %	—	—	13	9	10	10
Ключи, Алтайский край	26	w мм	—	—	91	83	78	77
		w %	—	—	26	24	23	22
		σ_w %	—	—	9	9	7	7
Михайловка, Павлодарская область	20	w мм	114	107	95	96	86	83
		w %	29	27	34	24	22	21
		σ_w %	11	10	9	7	6	6

% от полной влагоемкости) под яровой пшеницей

Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
123	105	92	90	79	64	60	59	73	63	63	72
31	26	23	22	20	16	15	15	18	16	16	18
15	16	13	16	15	14	14	14	15	14	13	13
106	110	90	76	71	61	48	49	61	64	72	71
27	28	23	22	18	15	12	12	15	16	18	18
9	6	8	8	8	10	7	7	10	15	11	11
124	116	98	80	65	58	60	66	64	71	91	113
30	28	24	19	16	14	15	16	16	17	22	27
11	9	11	10	10	10	8	10	9	7	10	10
116	107	96	95	89	81	65	66	58	53	55	47
31	29	26	25	24	22	17	18	16	14	15	12
8	9	9	10	11	14	14	11	13	10	11	11
114	98	94	83	72	65	66	72	80	85	—	—
32	28'	26	23	20	18	19	20	23	24	—	—
13	13	15	16	12	14	14	16	12	16	—	—
72	66	56	51	40	34	41	49	43	45	43	40
18	17	14	13	10	9	10	12	11	12	11	10
7	6	8	6	6	8	7	6	6	6	6	7
74	60	47	46	37	28	38	30	30	40	49	47
18	14	11	И	9	7	9	7	7	9	12	11
11	9	8	8	8	5	7	5	7	8	11	9
148	151	128	109	108	102	95	98	104	113	138	57
43	44	37	32	31	29	27	28	30	33	40	45
9	10	И	12	11	12	14	13	14	11	12	10
125	126	121	110	100	87	86	76	83	100	124	112
36	37	35	22	29	25	25	22	24	29	36	33
12	9	7	12	11	10	10	10	11	11	9	13
102	71	53	41	28	39	29	39	—	—	—	—
28	19	14	11	8	10	8	10	—	—	—	—
11	9	8	7	5	7	7	5	—	—	—	—
62	54	39	32	26	28	26	22	24	28	30	40
18	16	И	9	8	8	8	6	7	8	9	12
7	8	7	6	6	8	6	5	4	4	6	6
95	84	69	68	55	63	60	57	44	52	43	44
24	21	17	17	14	16	15	14	11	13	11	11
8	8	6	8	8	8	10	10	9	7	6	6

в большинстве случаев 100—160 мм продуктивной влаги. К концу этого периода запасы снижаются до 90—130 мм.

В засушливой зоне рост вегетативной массы начинается при запасах 100—120 мм (на супесчаных почвах 80—90 мм), в конце периода роста вегетативной массы запасы влаги составляют 60—70 мм (на супесчаных почвах 40—60 мм).

К началу колошения в районах Западной Сибири с достаточным увлажнением влагозапасы в почве составляют 80—110 мм. К уборке яровой пшеницы в метровом слое остается 50—80 мм продуктивной влаги.

В засушливых районах Западной Сибири и Казахстана на суглинистых почвах продуктивные влагозапасы равны 70—90 мм, а на супесчаных — 40—60 мм, при этом коэффициенты вариации составляют 80—100 %. При достижении растениями восковой спелости влагозапасы на суглинках снижаются до 40—60 мм, на супесчаных почвах — до 20—40 мм (коэффициенты вариации 60—100 %).

Таким образом, анализируя динамику запасов продуктивной влаги, можно сделать вывод (если принять за оптимальные запасы влаги на суглинках 170—190 мм, а на супесках 150—170 мм), что яровая пшеница как в районах с достаточным увлажнением, так и в районах с недостаточным увлажнением даже в среднем по влажности году испытывает недостаток во влаге. Лишь в отдельные годы влагозапасы бывают близки к оптимальным.

Для удобства дальнейших расчетов запасы продуктивной влаги были переведены в % от полной влагоемкости по слоям. Эти данные переводятся в табл. 8, 9, 10.

Следует отметить, что данные, приведенные в этих таблицах, рассчитаны по материалам наблюдений за 1945—1970 гг. и могут несколько отличаться от данных, приведенных в справочниках «Средние многолетние и вероятностные характеристики запасов продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми зерновыми культурами», так как периоды осреднения не совпадают. Так, для пункта Шадринск несовпадение наблюдалось в восьми декадах из 16 и составило по абсолютной величине от —2 до —11 мм в мае (слой 0—20 см), а в среднем около 3 мм.

3.2.3. Оценка суммарного расхода воды посевом яровой пшеницы

Следующим после режима влажности почвы важнейшим показателем для мелиорации является расход воды сельскохозяйственным посевом. Эта величина существенно зависит от климатических условий и от фаз развития растений.

Зная расход воды на единицу урожая, можно приблизительно оценить суммарное количество воды, которое необходимо для получения планируемого урожая. Кроме того, зная расходы воды по фазам вегетации, можно найти наиболее напряженные по дефициту влаги периоды и их считать важнейшими.

В табл. 11 приводятся результаты расчета¹ суммарного расхода воды (мм) по формуле [3]:

$$Q = w_n - w_k + H_6,$$

где w_n — запасы продуктивной влаги в почве весной (мм); w_k — запасы продуктивной влаги в почве к фазе восковой спелости яровой пшеницы (мм); H_6 — осадки за период посев—восковая спелость, уменьшенный на 5 дней.

Очевидно, такая методика расчета может быть использована лишь в том случае, когда интенсивность осадков не вызывает поверхностного стока, т. е. когда осадки впитываются и когда считается, что подпитывание со стороны грунтовых вод и инфильтрация за пределы расчетного слоя равны нулю.

В табл. II приведены результаты расчета суммарных расходов влаги по Новосибирску. В этой же таблице даны урожаи яровой пшеницы за 1945—1970 гг. по Новосибирскому ГСУ.

Существует предположение, что урожаи сельскохозяйственных культур линейно связаны с суммарными расходами за период вегетации. Для проверки этой гипотезы была предпринята попытка линейно скоррелировать эти величины. В табл. 11 показано, что коэффициент корреляции в Новосибирске в 2—3 раза превышает величину ошибки ($\Delta t = 0,2$) и может быть принят за достоверный, однако связь недостаточно плотная.

Можно предположить, что коэффициенты корреляции между суммарными расходами влаги, взятыми по основным межфазным периодам, позволят оценить «вклад» (вес) каждого этапа вегетации, а рассмотрение коэффициента корреляции позволит оценить вклад каждого слоя во время вегетации. В табл. 12 приведены результаты таких расчетов.

Для всех рассматриваемых слоев коэффициенты корреляции закономерно возрастают до фазы выход в трубку—колошение; в фазу колошение—молочная спелость они несколько убывают, оставаясь, однако, значительными. Таким образом, подтверждается уже замеченное в практике обстоятельство, свидетельствующее о том, что суммарные расходы влаги в период кушение—молочная спелость наиболее значимы для урожая, а важнейшим периодом или, как его еще называют, «критическим» периодом для яровой пшеницы является выход в трубку—колошение.

¹ Расчеты выполнены совместно с Н. А. Байбаевой.

Таблица 11

Зависимость урожая яровой пшеницы от суммарных расходов влаги за вегетационный период. Огурцово (Новосибирск)

Год	Суммарный расход влаги в слое почвы 0—100 см (мм)	Урожай яровой пшеницы (средний из стандартных сортов твердой и мягкой пшениц), т/га	Год	Суммарный расход влаги в слое почвы 0—100 см (мм)	Урожай яровой пшеницы (средний из стандартных сортов твердой и мягкой пшениц), т/га
1945	185	0,94	1958	141	1,72
1947	330	2,01	1959	242	2,31
1948	248	1,95	1960	242	2,39
1949	279	1,37	1961	199	1,97
1950	270	1,54	1962	178	1,55
1951	137	1,13	1964	246	2,50
1952	213	0,92	1965	138	0,56
1953	174	1,09	1966	213	2,64
1954	315	3,30	1967	151	1,65
1955	208	0,33	1968	163	9,8
1956	315	3,24	1969	172	8,4
1957	314	2,76	1970	237	24,4

Средний суммарный расход $Q = 221$ мм.

Среднее квадратическое отклонение $\sigma = 60$.

Коэффициент корреляции $r = 0,67$.

Уравнение регрессии $U = 9,2 \cdot 10^{-3}Q - 0,27$ т/га.

Пределы действия уравнения:

для суммарных расходов 137—330 мм;

для урожая яровой пшеницы 0,33—3,30 т/га.

Таблица 12

Зависимость урожая яровой пшеницы U от суммарного расхода влаги Q по межфазным периодам (Новосибирск, гмс и Новосибирский ГСУ, 1945—1970 гг.)

Межфазный период	В слое P—20 см			В слое 0—50 см			В слое 0—100 см		
	суммарный расход, мм		r_{UQ}	суммарный расход, мм		r_{UQ}	суммарный расход, мм		r_{UQ}
	средний	σ		средний	σ		средний	σ	
Посев—всходы	12,2	8,3	—0,37	10,4	14,5	—0,26	9,4	20,4	—0,20
Всходы—3-й лист	16,2	9,8	0,02	21,4	16,6	—0,04	23,7	13,4	—0,002
3-й лист—кущение	9,7	6,8	0,19	11,0	7,2	—0,30	11,7	13,0	—0,37
Кущение—выход в трубку	19,4	16,1	0,52	21,5	23,1	0,48	20,6	27,3	0,38
Выход в трубку—колошение	56,4	29,8	0,59	75,4	25,4	0,61	82,6	26,6	0,52
Колошение—молочная спелость	38,0	22,4	0,46	42,8	23,0	0,54	53,4	30,4	0,42

Кроме этого, в начале вегетации связь между расходами воды и урожаем отрицательная, т. е. чем меньше расходы в этот период, тем выше урожай. Это обстоятельство для периода посев—всходы вполне объяснимо, так как расход воды идет за счет физического испарения и чем меньше влаги в этот период испарится, тем больше ее останется для последующих периодов и тем выше будет урожай.

Интересно отметить, что в период всходы—третий лист связь между урожаями и суммарным расходом практически исчезает и становится достоверной к периоду кущение—выход в трубку.

На основании проведенных расчетов получены приближенные оценки суммарных расходов воды на единицу продукции в различных пунктах: Комсомолец (Кустанайская область) — 159, Шадринск (Курганская область)—46, Новосибирск (Огурцово) — 109, Ишим (Тюменская область) — 159, Чарлак (Омская область) — 139, Ключи (Алтайский край) — 132, Михайловка (Павлодарская область) — 145.

Следует отметить, что такие оценки, по-видимому, справедливы для районов с недостаточным и неустойчивым увлажнением.

По-видимому, для урожая с различной обеспеченностью, как малой (10%), так и большой (90%), суммарные расходы влаги должны подчиняться общей закономерности.

Для получения такой закономерности были проведены расчеты, в которых сопоставлялись урожаи конкретных лет с урожаем, близким к урожаю различной обеспеченности P_v ($P_v\%$, $P_{25}\%$, $P_{50}\%$, $P_{75}\%$, и $P_{90}\%$). Для этих лет были вычислены суммарные расходы влаги за вегетацию. Результаты расчетов приведены на рис. 9. Как видно из графика (рис. 9), для высоких урожаев (75—90 %-ной обеспеченности) суммарные расходы влаги, несмотря на большое разнообразие природных условий, колеблются в незначительных пределах по сравнению с низкими — от 400 до 1600 м³/га/т.

При средних урожаях ($P_v = 50\%$) происходит увеличение суммарных расходов влаги (до 700—1900 м³/га/т), хотя диапазон расходов не меняется.

При низких урожаях ($P_v = 10\div 25\%$) диапазон расходов значительно расширяется (урожай 25%-ной обеспеченности — расходы влаги 1000—3100 м³/га/т) и абсолютные величины суммарных расходов влаги возрастают.

Таким образом, при расчетах водопотребления яровой пшеницы для широкого диапазона условий можно принимать, что расход воды на 1 т урожая не превышает 1500 м³, в то же время следует отметить, что при низких урожаях (меньше средних многолетних) расход воды происходит непродуктивно.

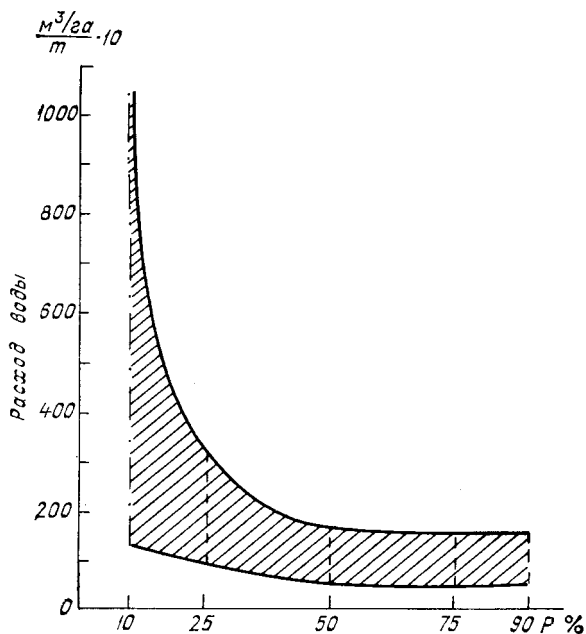


Рис. 9. Расходы воды (м³/га) на тонну урожая яровой пшеницы в зависимости от обеспеченности урожая.

3.3. Расчет требований твердых и мягких сортов яровой пшеницы к режиму влажности почвы

Выше были приведены основные исходные данные для расчета требований яровой пшеницы. В целях более детального анализа расчет проводился дифференцированно по твердым и мягким сортам для обеспеченностей урожая 10, 25, 50, 75 и 95 % в слоях почвы 0—20, 0—50 и 0—100 см.

Методика расчета была изложена выше (п. 1.6). Блок-схема программы расчета, составленной Ю. М. Земляновым, приведена на рис. 10.

В результате расчетов были найдены параметры математической модели (1.8), которую можно для данного случая переписать в виде

$$S(w) = \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{\gamma w_{opt}} \left(\frac{w_{max} - w}{w_{max} - w_{opt}} \right)^{\gamma (w_{max} - w_{opt})}. \quad (3.1)$$

Или, учитывая, что $w_{max} = 1,0$, можно записать

$$S(w) = \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{\gamma w_{opt}} \left(\frac{1 - w}{1 - w_{opt}} \right)^{\gamma (1 - w_{opt})}. \quad (3.2)$$

Параметры w_{opt} и u приведены в табл. 13. Влажность в долях от полной продуктивной влажности записывается в виде

$$w^* = \frac{w - w_{\text{вз}}}{w_{\text{пв}} - w_{\text{вз}}}, \quad (3.3)$$

где w — объемная влажность (мм); $w_{\text{вз}}$ — влажность завядания (мм); $w_{\text{пв}}$ — полная влагоемкость (влажность полного насыщения); γ — безразмерный параметр, характеризующий степень саморегулирования растений в различные декады.

Результаты расчетов для слоя 0—50 см по мягким и твердым сортам пшеницы приведены на рис. 11 и 12.

Характерным на этих графиках является некоторое уменьшение оптимальной влажности w_{opt} в зависимости от обеспеченности урожая P_u , т. е. более низкому уровню урожайности соответствует и более низкий уровень оптимальной влажности. Это обстоятельство может быть интерпретировано в рамках концепции прямой зависимости урожая от фотосинтетически активной радиации [формула (1.10)], по которой низкие урожаи в основном обусловлены низким уровнем радиации и интенсивность суммарного испарения соответствует возможной скорости подтока влаги к корням растений, несмотря на то что оптимальная влажность несколько понижена.

Значительно более существенно различается оптимальная влажность по фазам развития растения. Так, в начале вегетации оптимальная влажность должна быть повышенной и должна

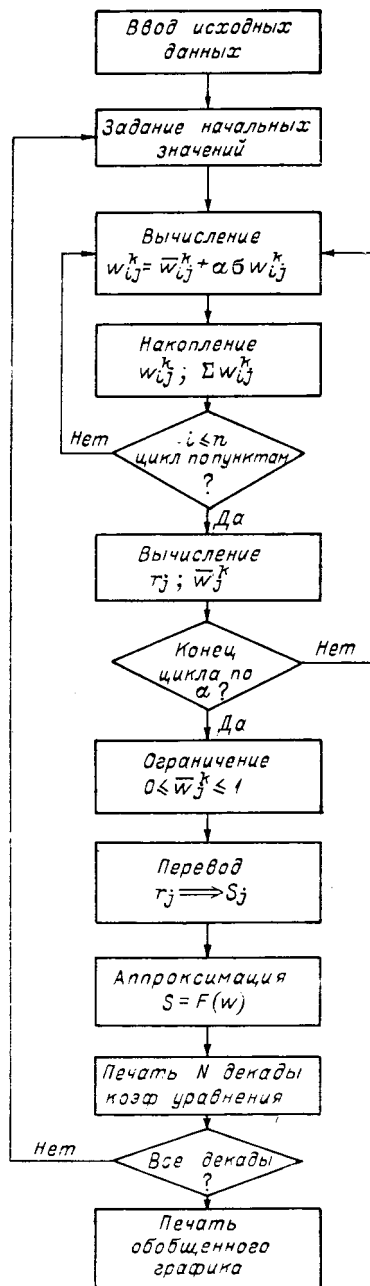


Рис. 10. Блок-схема программы расчета требований растений к условиям внешней среды.

Диапазон изменения γ и w_{opt} в модели (3.2) за период вегетации

$P_U = 95\%$		$P_U = 75\%$		$P_U = 50\%$		$P_U = 25\%$		$P_U = 10\%$	
γ	w_{opt}	γ	w_{opt}	γ	w_{opt}	γ	w_{opt}	γ	w_{opt}
1,28—10,05	0,01—0,57	1,45—10,14	0,01—0,56	1,72—11,74	0,03—0,46	1,74—8,13	0,02—0,47	1,74—6,32	0,01—0,46
1,51—3,86	0,40—0,56	1,59—13,92	0,16—0,58	1,74—8,05	0,01—0,46	1,50—12,10	0,01—0,42	1,88—14,51	0,03—0,42
1,66—18,80	0,04—0,56	1,20—18,10	0,04—0,59	1,45—11,02	0,02—0,56	1,69—6,50	0,01—0,56	2,16—10,55	0,01—0,28
0,95—11,75	0,02—0,56	0,26—7,33	0,05—0,62	1,44—11,95	0,03—0,47	1,47—10,10	0,01—0,46	0,78—11,60	0,01—0,47
1,62—10,71	0,05—0,61	2,30—10,47	0,05—0,55	2,55—10,55	0,05—0,46	2,60—9,82	0,05—0,46	1,95—9,40	0,02—0,46
1,42—10,19	0,09—0,60	1,48—9,95	0,06—0,60	2,19—8,28	0,06—0,52	3,05—9,76	0,06—0,45	2,51—10,02	2,51—10,02

Твердые сорта

Слой 0—20 см

Слой 0—50 см

Слой 0—100 см

Мягкие сорта

Слой 0—20 см

Слой 0—50 см

Слой 0—100 см

Примечание. Абсолютная величина параметра γ существенным образом зависит не только от данных, по которым проводится идентификация модели, но и от методов поиска максимума. В то же время начиная с $\gamma \approx 5$ ширина оптимального диапазона ($S=0,8$) меняется несущественно. Величина оптимальной влажности w_{opt} в меньшей степени зависит от этих факторов.

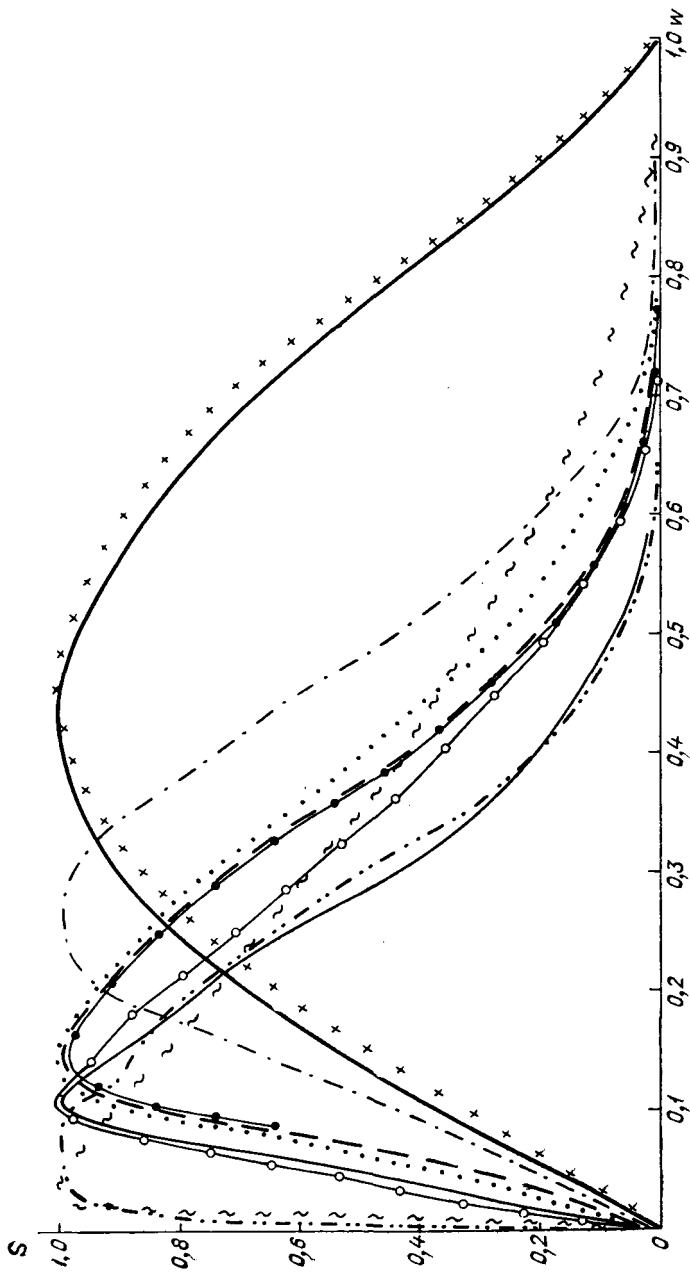


Рис. 11а. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для мягких сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_{0.1} = 10\%$.

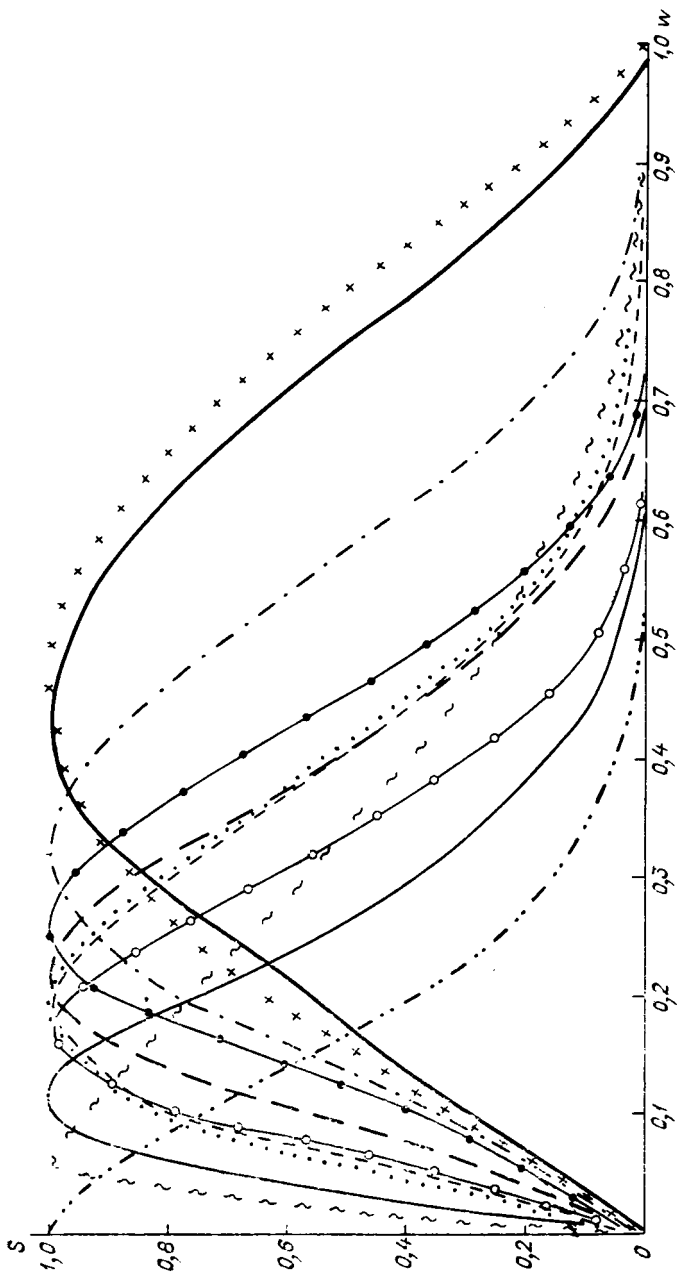


Рис. 116. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для мягких сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_v = 25\%$.

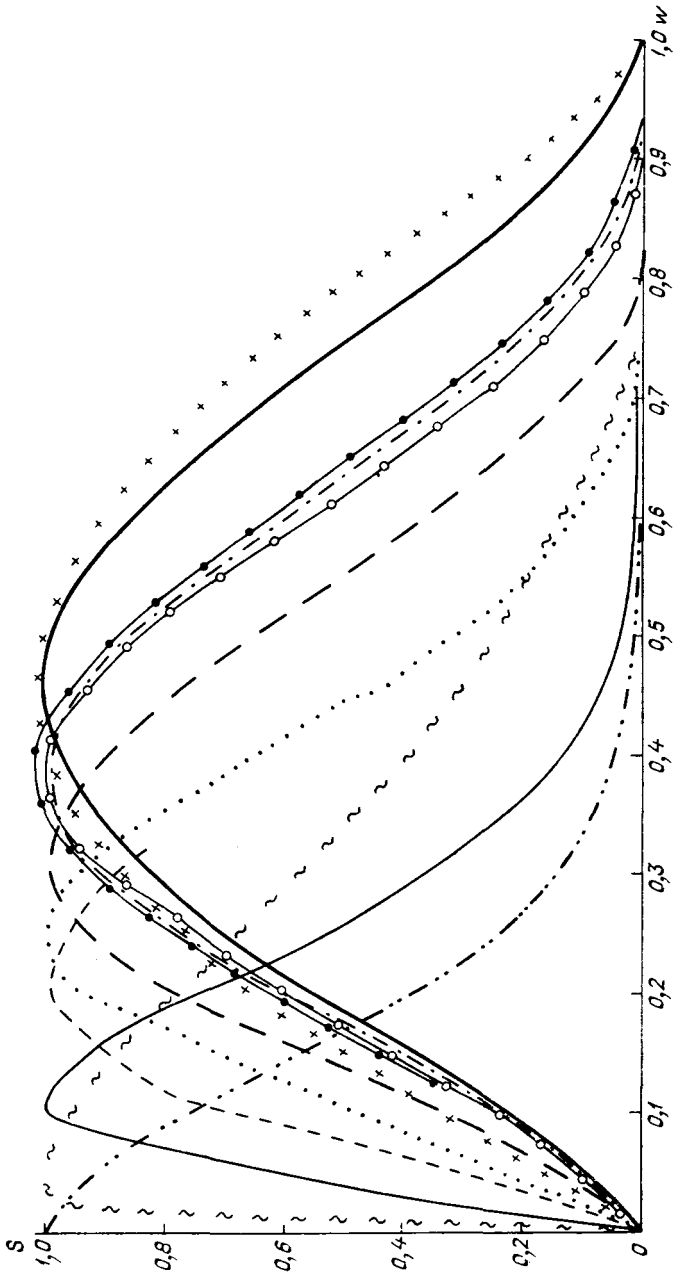


Рис. 11в. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0-50 см для мягких сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_U = 50\%$.

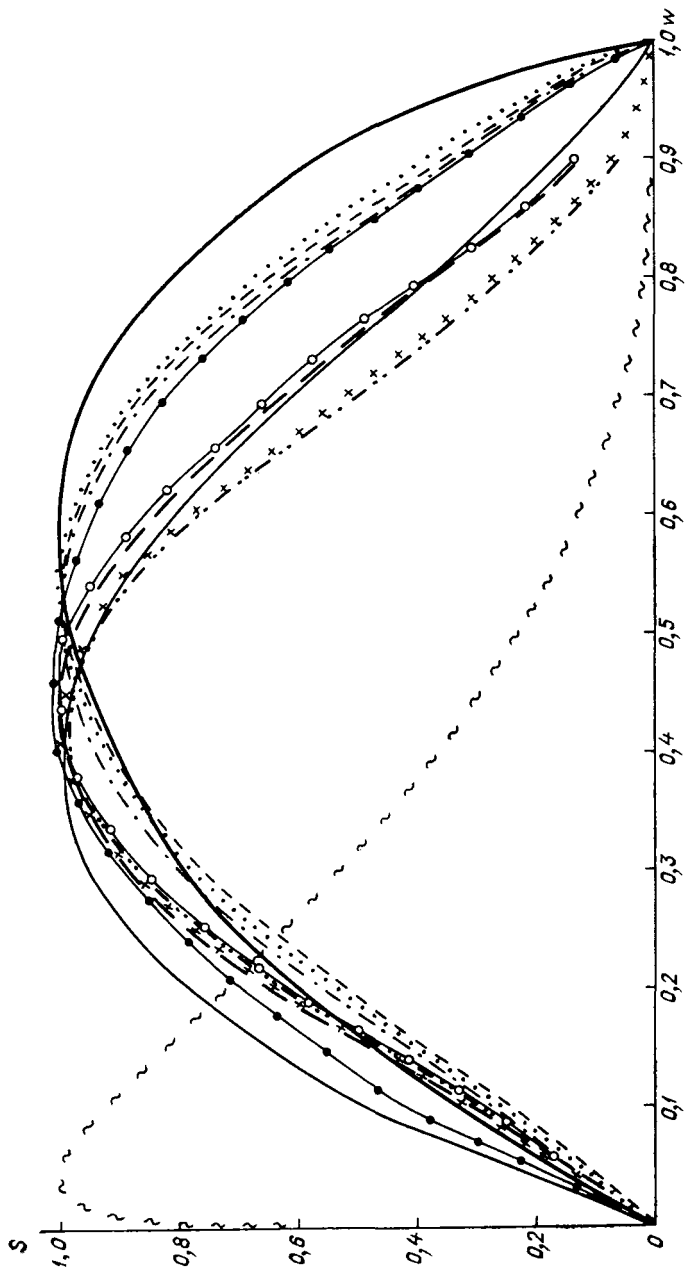


Рис. 11г. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для мягких сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_{\sigma} = 75\%$

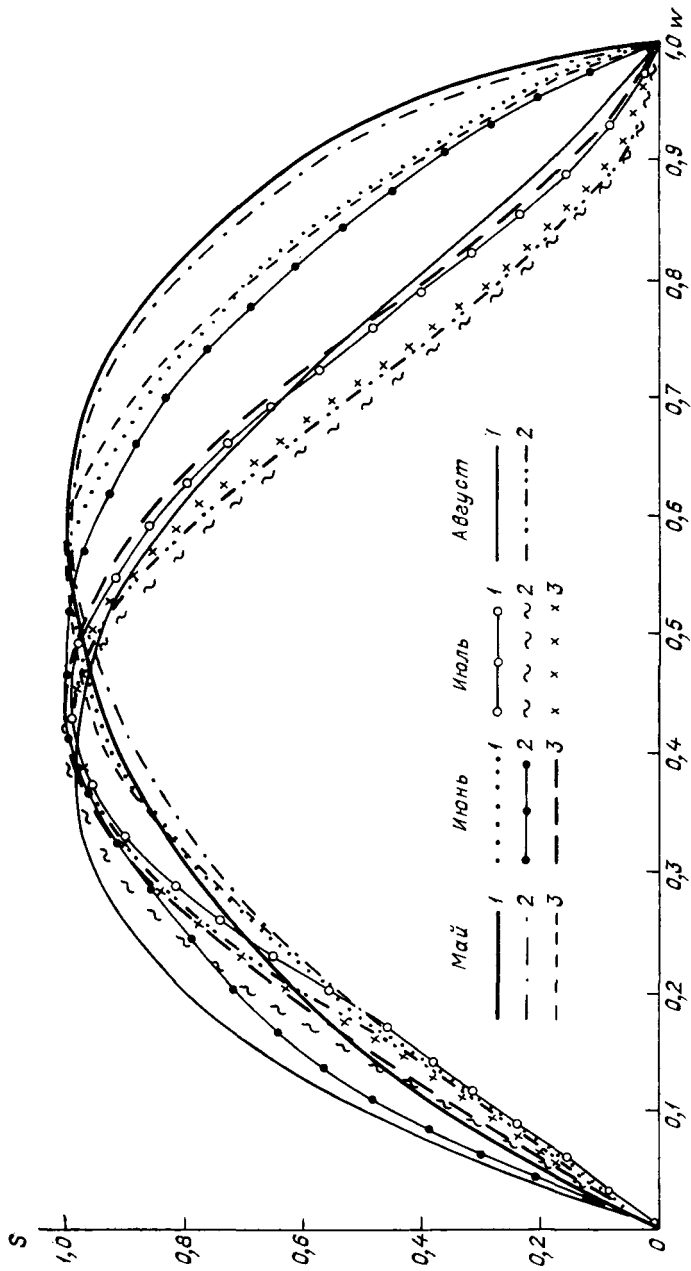


Рис. 11д. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для мягких сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_v = 95\%$.

На рис. 11а—11д 1, 2, 3 — декады.

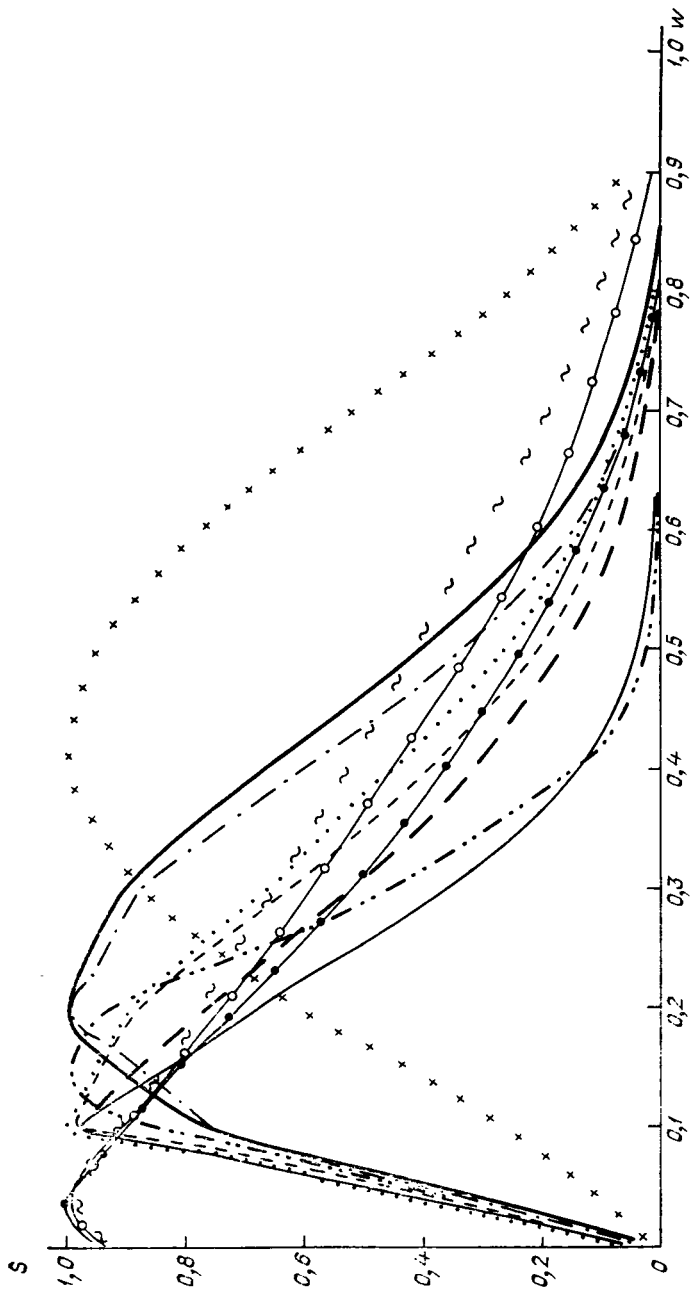


Рис. 12а. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для твердых сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_{\sigma} = 10\%$.

Усл. обозначения см. рис. 11д.

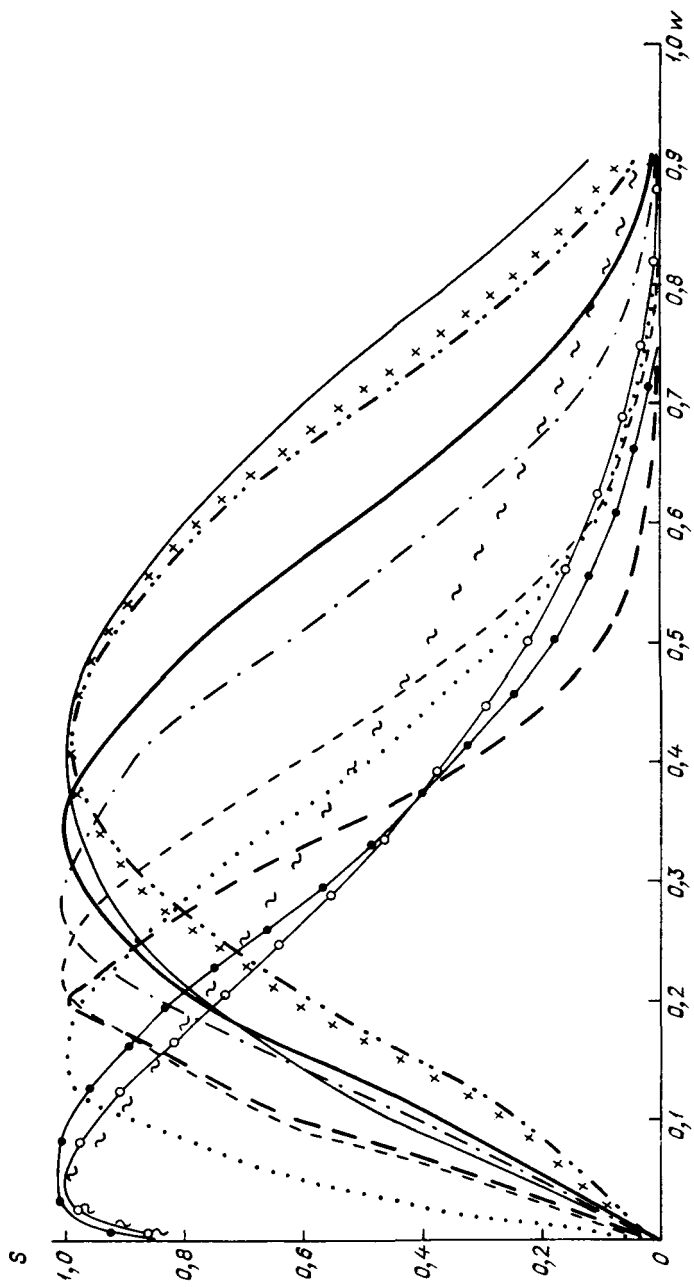


Рис. 126. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для твердых сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_{0.25} = 25\%$.

Усл. обозначения см. рис. 11д.

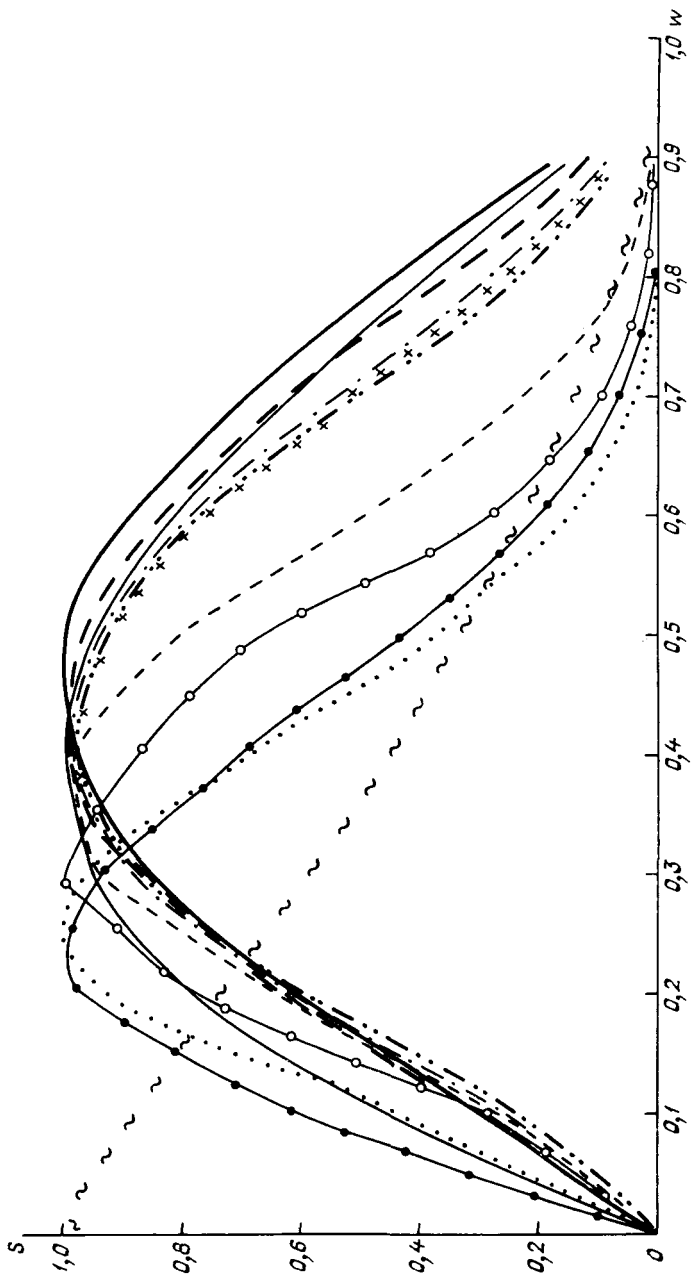


Рис. 12в. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для твердых сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_U=50\%$.
Усл. обозначения см. рис. 11д.

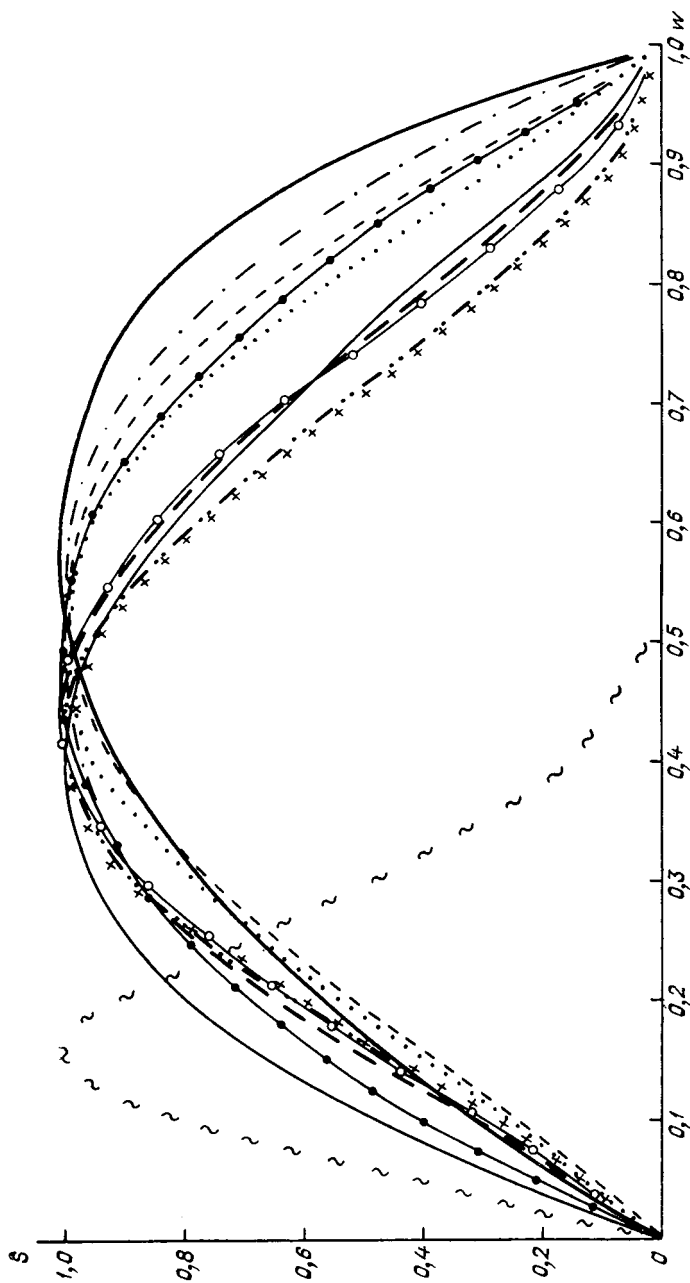


Рис. 12г. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для твердых сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_{\text{н}} = 75\%$.

Усл. обозначения см. рис. 11д.

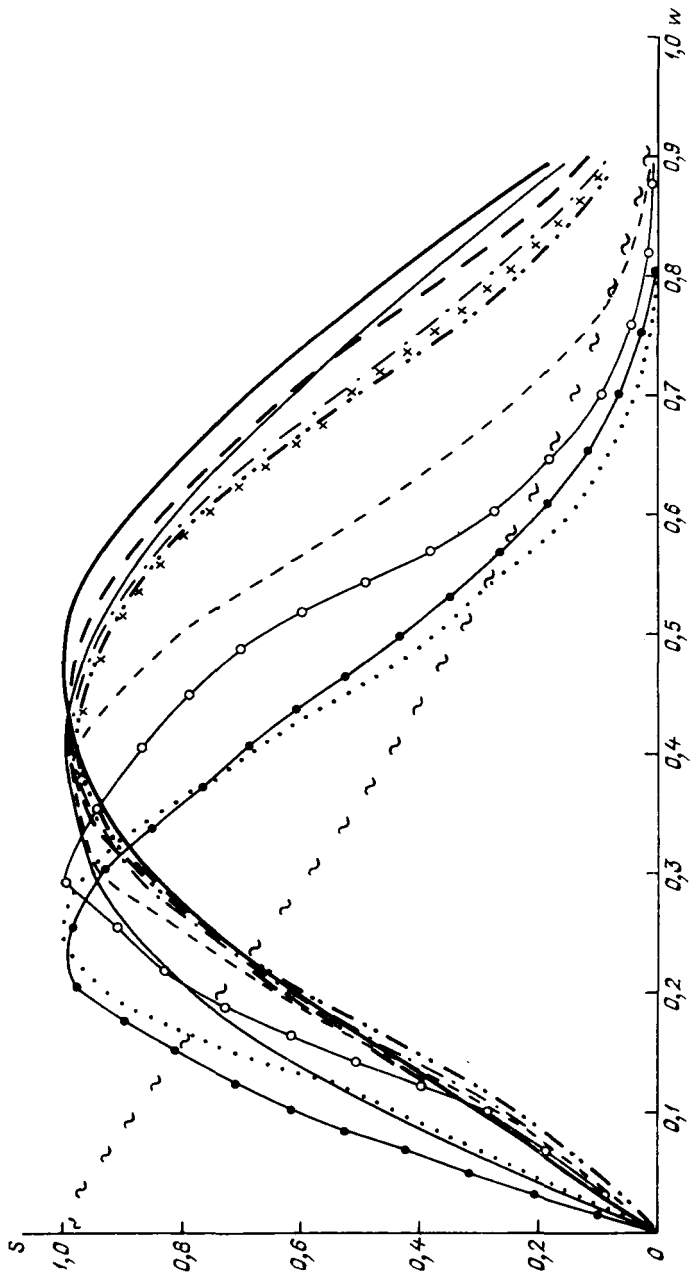


Рис. 12в. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для твердых сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_V = 50\%$.

Усл. обозначения см. рис. 11д.

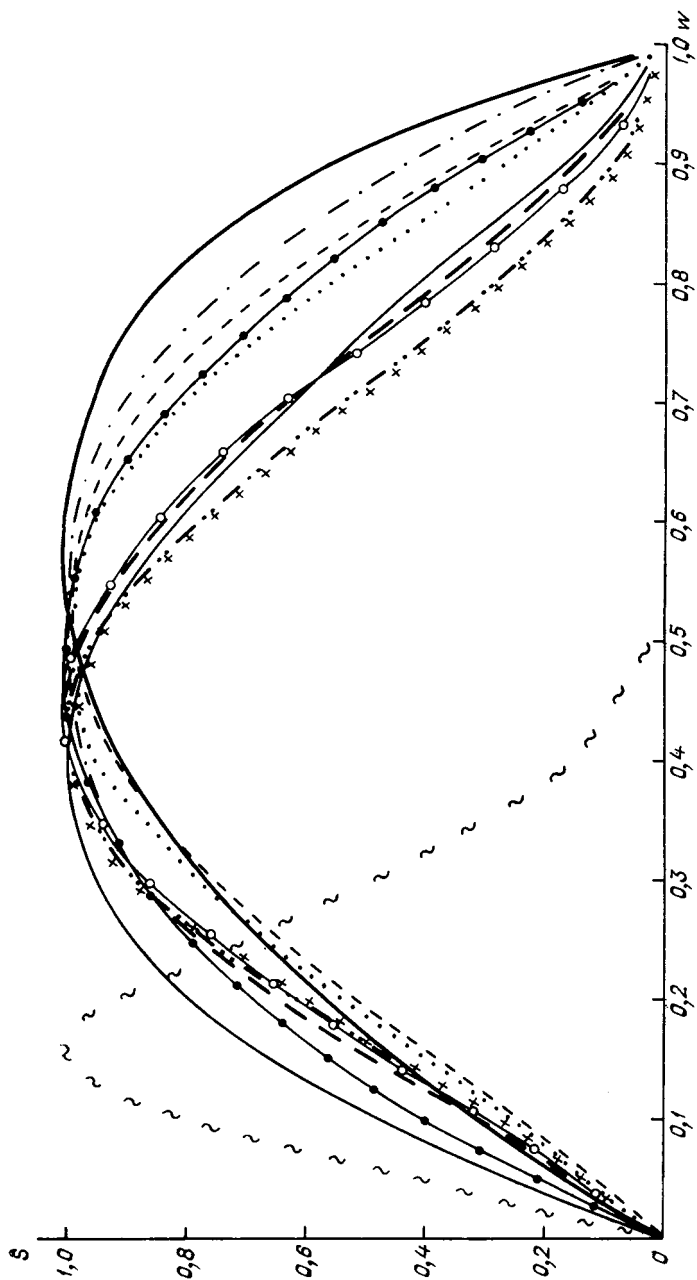


Рис. 12г. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для твердых сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_{07} = 75\%$.
Усл. обозначения см. рис. 11д.

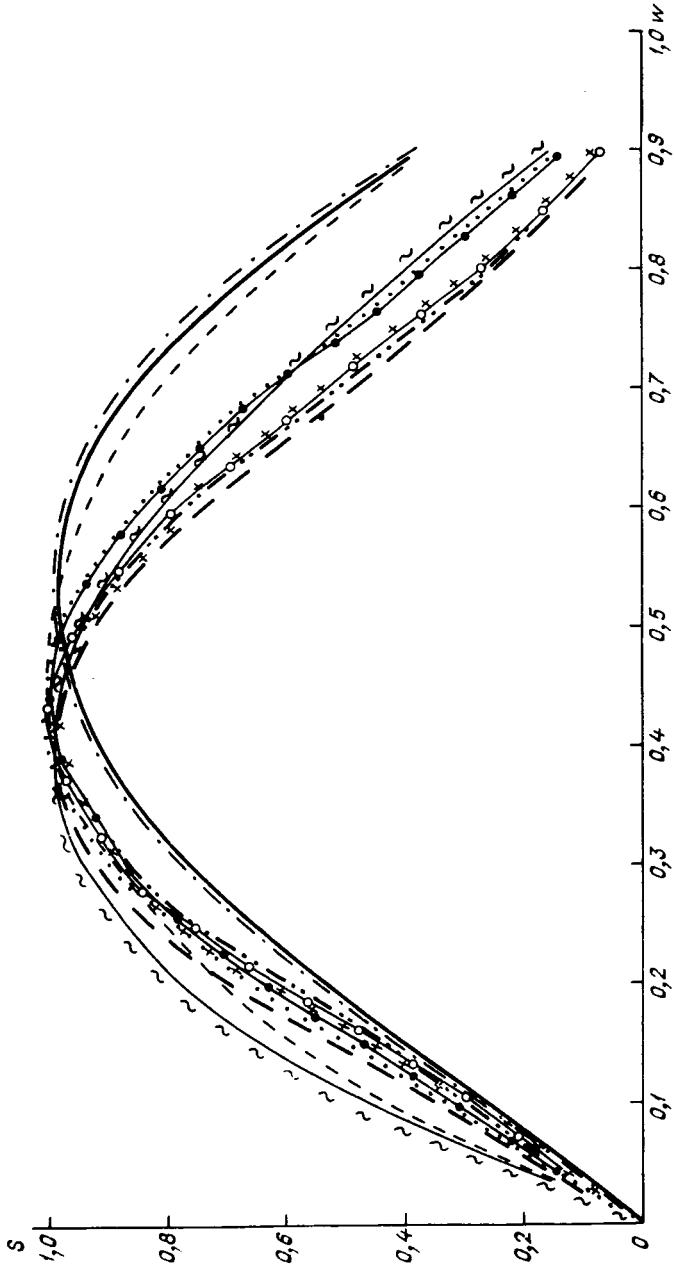


Рис. 12д. Зависимость относительной продуктивности S от влагозапасов почвы в слое 0—50 см для твердых сортов яровой пшеницы по декадам вегетации. $P_U=95\%$.
Усл. обозначения см. рис. 11д.

составлять в зависимости от уровня радиации $0,3—0,6w^*нв$; со временем она снижается и в момент выхода в трубку становится минимальной и равной $0,5a^*нв$ (слой $0—50$ см, $P_U = 50\%$). однако в следующую фазу — колошение — оптимальная влажность должна быть снова резко повышена, доведена

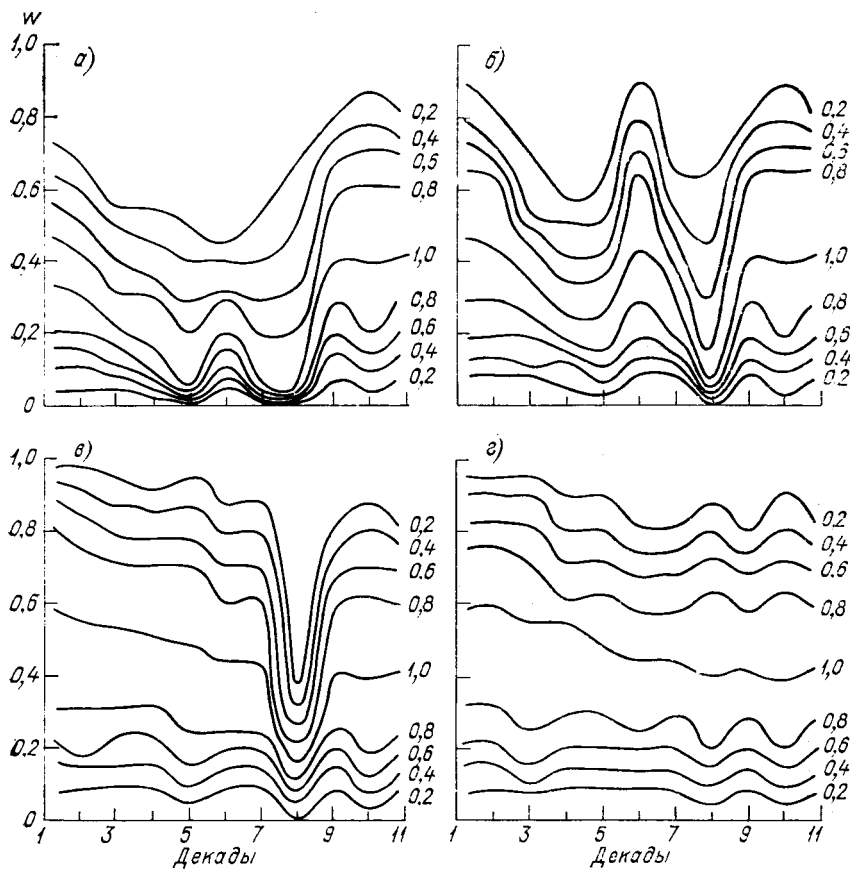


Рис. 13. Зависимость изменения требований твердых сортов яровой пшеницы к продуктивным влагозапасам w в слое $0—50$ см в течение вегетации.

а) $P_v=25\%$; б) $P_v=50\%$; в) $P_v=75\%$; г) $P_v=95\%$.

до уровня $0,8w^*нв$ и должна поддерживаться на уровне $0,6w^*нв$ до начала цветения. В фазу цветения оптимальная влажность может быть уменьшена до весьма малых величин (см. рис. 14 в, 8-я декада), но в следующую фазу — молочной спелости — необходимо повышение влажности до $0,8w^*нв$ для любой величины P_U .

Отсюда следует, что для каждого уровня радиации существует своя оптимальная траектория влагозапасов, игнорирование которой приведет к потерям урожая.

Таким образом, наблюдаются закономерные изменения оптимальной влажности во время вегетации, которые отражают

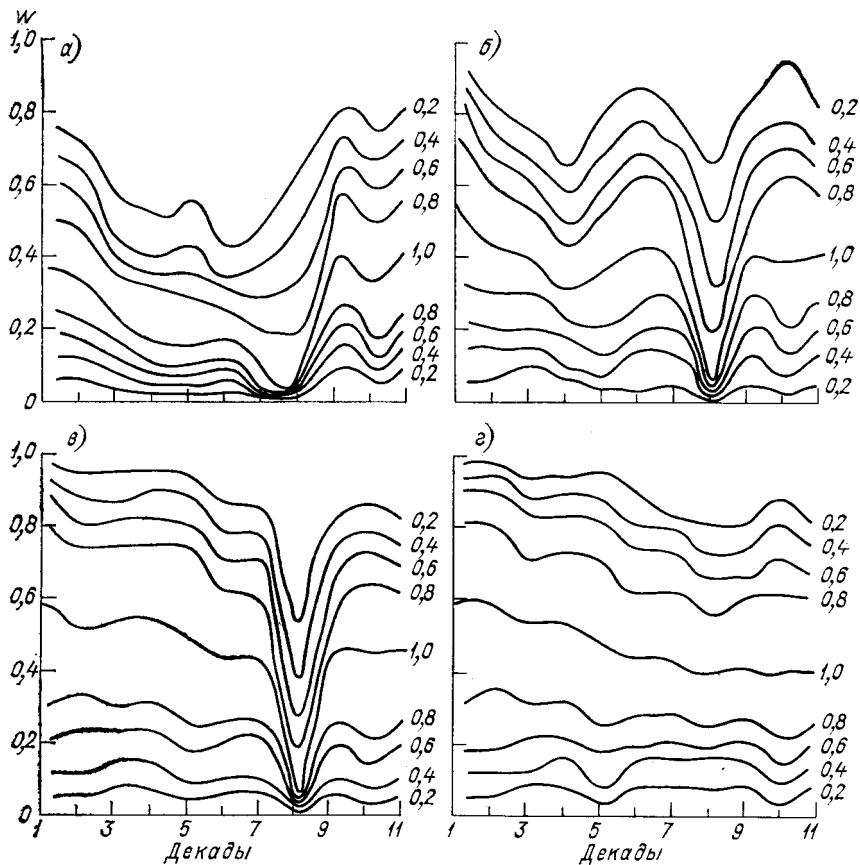


Рис. 14. Зависимость изменения требований мягких сортов яровой пшеницы к продуктивным влагозапасам w в слое 0—50 см в течение вегетации.

Усл. обозначения см. рис. 13.

биологические особенности развития яровой пшеницы. Это обстоятельство дает возможность предположить, что качественно расчеты не противоречат экспериментальным представлениям.

Более наглядно закономерности изменения оптимальных влагозапасов можно проследить по графикам (рис. 13 и 14), на которых показаны траектории изменения продуктивных

влажностных запасов для разных уровней относительной продуктивности 5, равной 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 и 1,0. На этих графиках видно, что при высокой радиации ($P_U = 95\%$), когда может быть получен высокий урожай, оптимальная влажность должна следовать по траектории $S=1$ и изменяться от 0,4 до $0,6\omega_{ПВ}$.

или от $0,8\omega_{НВ}$ до $1,2\omega_{НВ}$, если условно принять, что $НВ = 0,5\omega_{ПВ}^*$. В случае если уровень радиации соответствует $P_U = 75\%$, необходимо поддерживать довольно высокий уровень влажности, но в фазу цветения существенно снизить ее. При среднем уровне урожайности $P_U = 50\%$, соответствующем среднему уровню радиации, снижение влажности допустимо в фазу выхода в трубку. При очень низком уровне радиации ($P_U = 25\%$) оптимальная влажность должна быть снижена до $0,4-0,5\omega_{НВ}^*$ и только в фазу налива (9-я декада) необходим подъем ее до уровня $0,8\omega_{НВ}^*$.

Таким образом, анализ результатов расчетов по модели (1.8) показывает, что для получения максимального в сложившихся радиационных условиях урожая ($S=1,0$) необходимо довольно точное регулирование переменных влажностных запасов как по величине, так и во времени.

При поддержании постоянных влажностных запасов, как это рекомендуется в настоящее время в мелиоративной литературе, максимальный урожай получить нельзя.

3.3.1. Расчет осредненных за вегетацию требований растений к условиям среды

В целях проверки и сравнения графиков $S(w, \tau)$ (рис. 13, 14) при разном уровне радиации рассчитаем среднюю за вегетацию величину степени оптимальности по воде $S(w)$ для различных постоянных во время вегетации уровней влажности ($w^* = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$).

Как было показано выше, такие расчеты можно проводить по различным формулам (см. п. 1.5). В настоящей работе осреднение S_i проводилось по формулам (1.11) и (1.12), а коэффициенты η рассчитывались по литературным данным на основании экспериментов по поиску критических периодов развития пшеницы.

Так, в монографии Ф. Д. Сказкина [20] приводятся обширные данные о том, что с начала XX в. критическим периодом у злаков (а критические периоды он определяет по П. И. Броуну как «периоды, в течение которых растение или особенно нуждается в каком-либо метеорологическом факторе, или особенно боится его») считался межфазный период трубкование—колошение. Сказкин [20] расширяет пределы этого периода и считает его от выхода в трубку до полного цветения. Там же

и в других работах приводятся экспериментальные данные, позволяющие вычислить коэффициенты η , предположив, что они равны отношению возможных потерь урожая при неоптимальном режиме в i -тый момент времени ΔS_i^* к сумме потерь, получаемых при неоптимальных условиях в каждый момент вегетации. Для проведения таких расчетов были использованы эксперименты, где выявлялось влияние почвенной засухи на урожай пшеницы в разные фазы роста и развития [17].

В результате вегетационных опытов в [17] были получены следующие величины урожаев для различных сортов пшеницы:

Сорт	Урожай зерна (г на сосуд) при засухе в фазу					Оптимальная влажность, г/сосуд
	кущение	трубкование	колошение	формирование зерна	молочная спелость	
Мягкая пшеница						
Эритросперум 841	5,98	1,03	3,55	2,69	6,0	8,98
Лютесценс 62	3,98	0,87	1,12	2,80	5,24	8,18
Альборубрум 525	3,70	1,26	1,72	2,72	5,24	7,23
Твердая пшеница						
Меянопус 69	4,62	1,05	1,12	2,50	4,50	7,43
Меянопус 1932	4,52	0,21	0,86	3,11	4,28	5,43
Кандиканс 21/16	3,90	0,24	2,38	2,30	3,80	5,30

Расчет величины $S = U_i/U(w_{opt})$, получили следующие данные:

Сорт	Степень оптимальности (относительный урожай)				
	кущение	трубкование	колошение	формирование зерна	молочная спелость
Мягкая пшеница					
Эритросперум 841	0,675	0,115	0,395	0,293	0,667
Лютесценс 62	0,487	0,106	0,137	0,342	0,640
Альборубрум 525	0,511	0,175	0,238	0,376	0,724
$S_{ср. м}$	0,557	0,132	0,260	0,387	0,687
Твердая пшеница					
Меянопус 69	0,621	0,141	0,152	0,336	0,606
Меянопус 1932	0,833	0,039	0,158	0,573	0,790
Кандиканс 21/16	0,735	0,045	0,450	0,434	0,717
$S_{ср. т}$	0,730	0,075	0,253	0,448	0,703
$S_0 = \frac{S_{ср. м} + S_{ср. т}}{2}$	0,644	0,103	0,256	0,417	0,695
$S^* = 1 - S_0$	0,356	0,897	0,744	0,583	0,305

(S^* — степень неоптимальности условий)

Для того чтобы перевести значения S^* в веса η по всем фазам, нужно дополнить недостающие фазы соответствующими S^* значениями, например положить, что S^* на посев равно 0,12, на всходы 0,05, на третий лист 0,25, на восковую спелость 0,12. Тогда η можно вычислить по формуле

$$\eta_{S^*} = \Delta S_i^* / \sum \Delta S_i^*,$$

где $\Delta S_i^* = S_i^* - S_0^*$; S_0^* — возможные потери урожая при неоптимальной влажности в момент всходов.

Тогда значения η_{S^*} по фазам будут такими, как показано в табл. 14.

Таблица 14

Значение коэффициента η_{S^*}

	Посев	Всходы	3-й лист	Кущение	Трубкавание	Колошение	Формирование зерна	Молочная спелость	Восковая спелость
Декады									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_i^*	0,12	0,05	0,25	0,36	0,90	0,74	0,58	0,31	0,12
η_{S^*}	0,02	0	0,07	0,10	0,28	0,23	0,18	0,10	0,02

Как говорилось выше, проверку адекватности модели $S(w, t)$ природным требованиям растений нагляднее всего можно осуществить по осредненной кривой $\bar{S}(w)$, которая рассчитывается по формуле (1.11) или (1.12) для каждого уровня радиации.

Результаты такого расчета показаны на рис. 15. Первым характерным признаком кривых $\bar{S}(w)$ является их однообразие. Это еще раз подтверждает предположение о том, что различные по обеспеченности урожаи обуславливаются радиационным фактором, а требования к водным условиям для максимального (в данных условиях радиации) урожая являются генотипическим признаком.

Вторым признаком является то, что практически для всех уровней радиации резкое падение продуктивности наблюдается при $w^* = 0,3 \div 0,4$; по существующим классификациям, например [5, 10, 18], это влажность торможения роста, ниже которой имеет место низкая биологическая продуктивность.

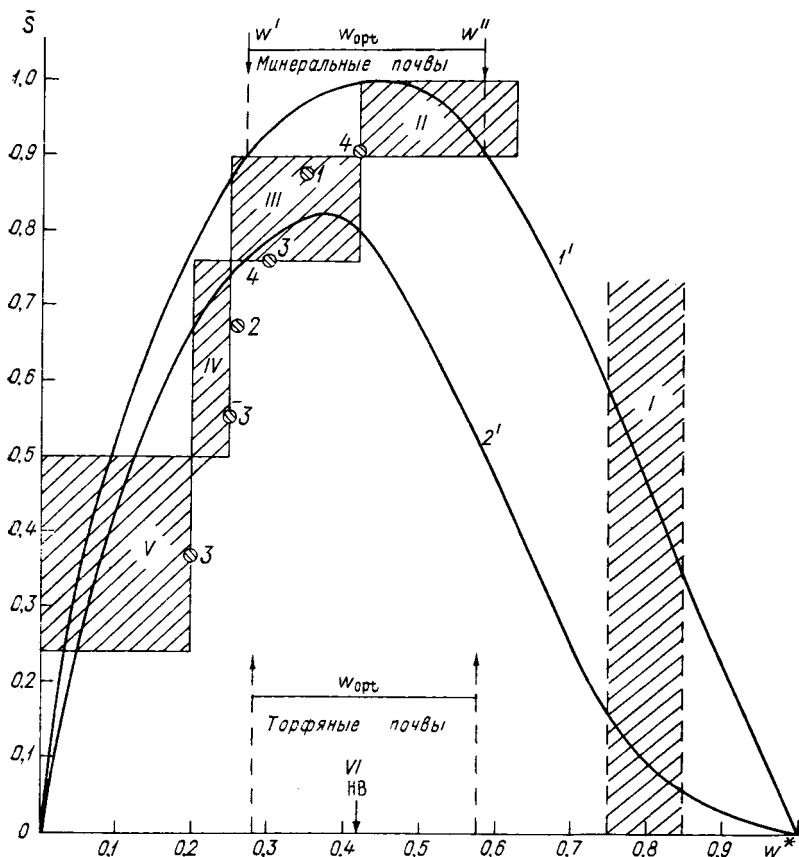


Рис. 15. Сравнение теоретических кривых $\bar{S}(\omega^*)$ с экспериментальными данными по критическим влажностям и оптимальным для растений диапазонам.

$1'$ и $2'$ — границы расположения теоретических кривых $\bar{S}(\omega)$ для различных обеспеченностей урожая ($P_{\min} \div P_{\max} = 50 \div 95\%$); ω' и ω'' — границы диапазона оптимальной влажности во время вегетации [29, с. 36].

Точки: 1) $\omega = 0,75 \omega_{\text{НВ}}^*$ (по данным С. П. Мастинской [11]); 2) $\omega_{\min} = 0,70 \omega_{\text{НВ}} = 0,27 \omega_{\text{ПВ}}$ [2]; 3) $\omega_{\min} = 0,75 \omega_{\text{НВ}} = 0,3 \omega_{\text{ПВ}}$ при $\omega_{\min} = 0,65 \omega_{\text{НВ}} = 0,25 \omega_{\text{ПВ}}$, снижение урожая на 0,6 т/га; при $\omega_{\min} = 0,60 \omega_{\text{НВ}} = 0,2 \omega_{\text{ПВ}}$, снижение урожая на 0,87 т/га [7]; 4) $\omega_{\min} = 0,75 \div 0,80 \omega_{\text{НВ}} = 0,3 \div 0,4 \omega_{\text{ПВ}}$ [12]; 5) $\omega_{\min} = 0,5 \div 0,7 \omega_{\text{ПВ}} = 0,23 \div 0,57 \omega_{\text{ПВ}}^*$ ($\omega_{\text{ВЗ}} = 0,3$) для низинных торфяных почв, по данным Х. И. Амнулла, Г. И. Лашкевича, Н. Ф. Лебедевича, П. Б. Свиклиса [28].

Степени увлажнения по биологической продуктивности почвы [10]: I — избыточное увлажнение; II (1—0,9 балла) — максимальная биологическая продуктивность [оптимальное содержание воздуха и воды (1,2—0,8 НВ)]; III (0,9—0,75 балла) — пониженная биологическая продуктивность (от 80% НВ — влажности торможения роста); IV (0,75—0,5 балла) — низкая биологическая продуктивность (влажность торможения роста — 0,55 НВ); V (0,5—0,25 балла) — очень низкая биологическая продуктивность (0,55 НВ — влажность завядания).

Третий признак — это невозможность получить 100%-ный урожай, поддерживая влажность постоянной, т. е. не изменяя ее во время вегетации согласно кривой $S(w, \tau) = 1,0$. Поэтому все кривые, кроме $U_{95} \%$, в своем максимуме не достигают значения $\bar{S} = 1,0$.

Интересно отметить, что оптимальная влажность для всех кривых ($P_U > 0,5$) лежит в пределах $0,4—0,5w_{\text{ПВ}}^*$ (полной продуктивной влагоемкости); учитывая, что наименьшая влагоемкость $w_{\text{НВ}}^*$ приближенно равна $0,5w_{\text{ПВ}}^*$, находим, что оптимальная влажность расположена в диапазоне $0,8—1,0w_{\text{НВ}}^*$. Это обстоятельство также широко подтверждается в литературе.

До сих пор говорилось о качественной сходимости кривой $\bar{S}(w)$ с экспериментальными данными. Дальнейшую проверку правильности кривой $\bar{S}(w)$, а следовательно, и кривых $S(w, \tau)$ можно осуществить, нанося на теоретическую кривую экспериментальные точки, полученные различными учеными (табл. 15, рис. 16).

На рис. 16 приведены данные, полученные на опытном участке «Лесное» в 1971—1973 гг.; ряд точек получен в США и в Канаде; используются и рекомендации Белгипроводхоза [23] с учетом «веса» фазы η_5^* при $w_{\text{вз}} = 0,4$. Следует отметить, что совпадение экспериментальных данных с теоретическими кривыми $\bar{S}(w)$ для разных уровней радиации удовлетворительное. Это обстоятельство можно считать косвенным доказательством того, что и кривые $S(w, \tau)$ будут удовлетворительно совпадать с экспериментальным материалом.

Известно, что данных по изменению оптимальных влажностей во время вегетации очень немного, поэтому они являются наиболее интересными, но даже имеющиеся материалы позволяют определить лишь ход оптимальной влажности во времени $S_{1,0\text{opt}}(w, \tau)$ и не дают возможности количественно оценить временное или постоянное отклонение действительной влажности от оптимальной. Однако для проверки теоретических кривых $S(w, \tau)$ можно использовать существующие данные, соответственно переводя величины влажности в продуктивные влагозапасы в долях от полной влагоемкости (рис. 17). Такой перевод можно осуществить, предположив, что полные продуктивные влагозапасы для минеральных почв составляют 330 мм (суглинистые почвы), влажность завядания $0,2w_{\text{на}}$, $w_{\text{НВ}} = 0,7dw_{\text{ПВ}}$ [3, 15, 24], для торфяных почв влажность завядания $0,3w_{\text{ПВ}}$, $w_{\text{НВ}} = 0,7w_{\text{ПВ}}$ [23, 30].

Таблица 15

Экспериментальные данные, полученные на опытном участке «Лесное»
(яровая пшеница) (по данным Н. П. Буниной, В. М. Лавриченко,
А. И. Узуяна, Е. А. Шкунова)

Вариант	УГВ, м	\bar{w}	\bar{w}^*	U	\bar{S}	S_n	№ точек
---------	--------	-----------	-------------	-----	-----------	-------	---------

1971 г.

Лизиметр 1	1,5	0,58	0,42	3,13	0,57	$0,57 \cdot \frac{1}{0,7} = 0,32$	14
Лизиметр 3	2,0	0,61	0,48	3,37	0,61	$0,61 \cdot \frac{1}{0,7} = 0,87$	15
Лизиметр 4	2,0	0,66	0,58	3,36	0,61	$0,61 \cdot \frac{1}{0,7} = 0,87$	16
Лизиметр 5	1,0	0,61	0,58	5,50	0,99		
Лизиметр 6	1,0	0,59	0,43	5,54	1,00		
Лизиметр 7	0,55	0,77	0,81	2,47	0,45	$0,45 \cdot \frac{1}{0,6} = 0,65$	17
Лизиметр 8	Переменный	0,53	0,42	4,55	0,82		

1972 г.

Лизиметр 5	1,14	0,63	0,52	1,89	0,83		
Лизиметр 6	1,04	0,65	0,56	2,29	1,00		
Вариант 6	(0,5—1,0)	0,64	0,54	1,50	0,62		
Вариант 7	0,5—0,8	0,65	0,56	1,51	0,63		
Вариант 1	0,8—1,3	0,53	0,31	2,40	1,00		

1973 г.

Лизиметр 5	1,03	0,54	0,33	4,22	0,83		
Лизиметр 6	1,0	0,54	0,33	5,13	1,00		
Вариант 6	0,6—1,2	0,63	0,52	2,47	0,94		
Вариант 8	0,6—1,1	0,61	0,48	2,24	0,86		
Вариант 13	0,5—1,1	0,65	0,56	2,62	1,0		

Примечание. \bar{w} — средняя за вегетацию объемная влажность в слое 0—50 см ($\text{см}^3/\text{см}^3$); \bar{w}^* — средняя продуктивная влажность в долях от полной влагоемкости ($w_{\text{ВЗ}} = 0,38$; $w_{\text{ПВ}}^* = 0,86$); U — урожай (т/га); \bar{S} — относительный урожай, равный U/U_{max} ; \bar{S}_U — относительный урожай, приведенный к УГВ=1,0 м.

Кроме этого, приведем диапазоны влагозапасов, при которых были получены максимальные урожаи в естественных условиях Западной Сибири и Северного Казахстана (табл. 16).

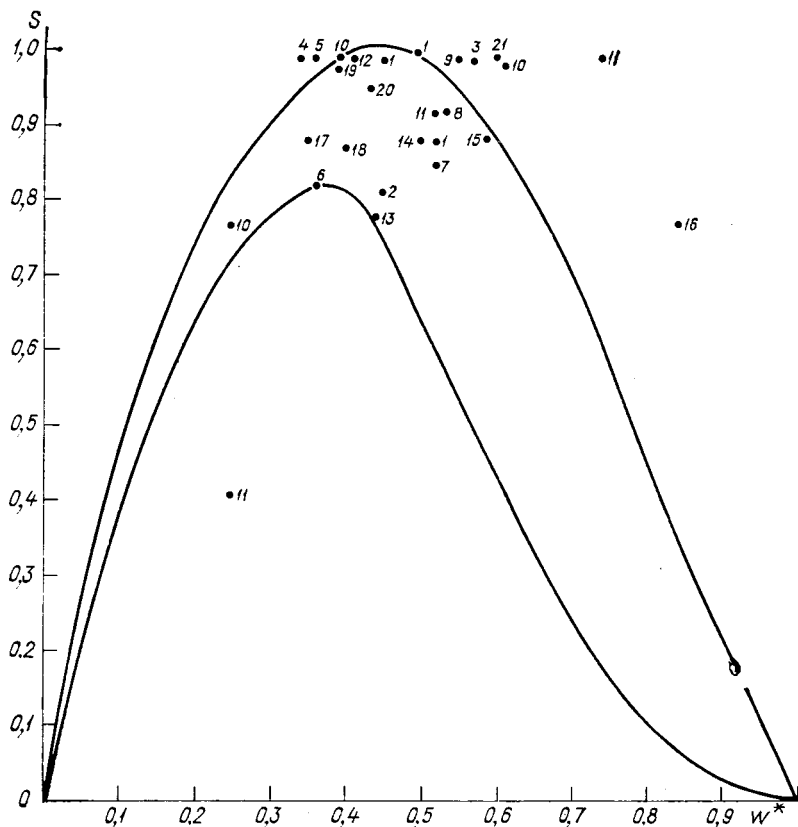


Рис. 16. Сравнение теоретической зависимости $S(w^*)$ (кривые) с экспериментальными данными (точки).

Опытный участок «Лесное», лизиметры: 1) 1971 г., УГВ = 1,0 м, 2) 1971 г., УГВ переменный, 3) 1972 г., УГВ = 1,14 м, 5 и 6) 1973 г., УГВ = 1,0 м; 4) «Лесное», 1972 г., УГВ = 0,8±1,3 м; «Лесное», 1973 г.: 7) УГВ=0,6±1,1 м, 8) УГВ=0,6±1,2 м, 9) УГВ = 0,5±1,1 м; 10, 11) относительный урожай при различных нижних пределах предподливной влажности почвы. США, штат Вашингтон; Канада, Южный район (цит. по [11, с. 72]; 12) Белгипроводхоз [23] — средняя за вегетацию с учетом «веса» фазы 0,78 $w_{нв}$ =0,78 (0,5 $w_{нв}$ =0,39 $w_{нв}$; 13, 14, 15, 16) «Лесное», 1971 г., лизиметры, УГВ соответственно 1,5, 2,0, 2,0 и 0,55 м; 17, 18, 19, 20) «Лесное», 1973 г., лизиметры, УГВ соответственно 1,45, 1,49, 1,94, 2,04, 0,56 и 0,54 м (урожаи в точках 13 ÷ 21 приведены к урожаям при УГВ—1,0 м).

Сравнение экспериментальных данных и теоретических зависимостей $S(w, t)$ показывает хорошую сходимость, так как все рекомендации не выходят за пределы $\pm 0,8_{opt}$ (рис. 17).

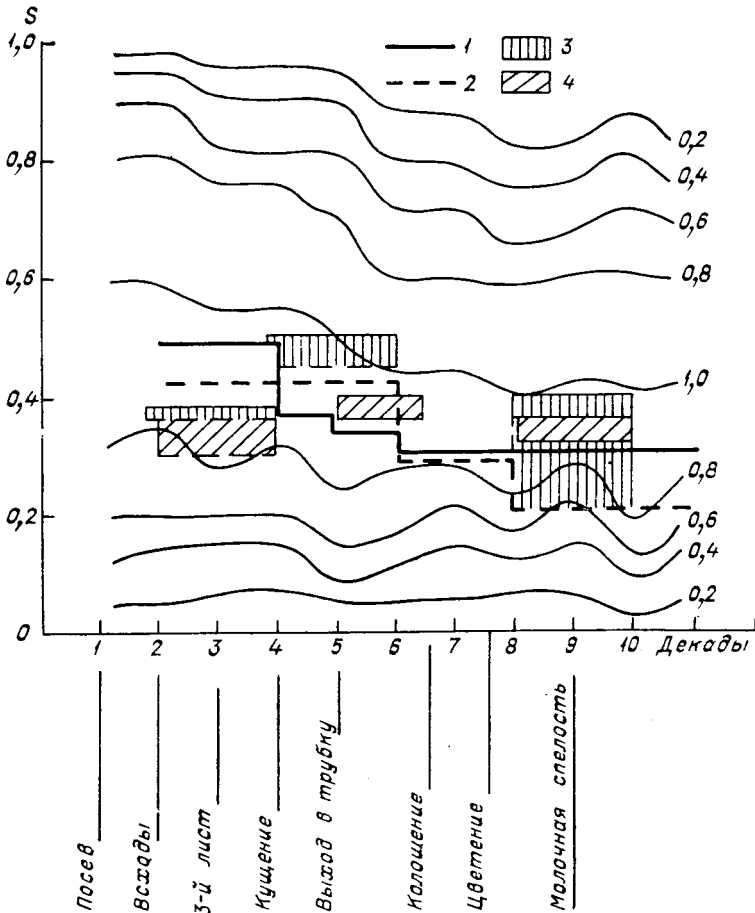


Рис. 17. Сравнение расчетной зависимости $S(w, \tau)$ при $P_U=95\%$, слой 0—50 см (сплошные кривые) с экспериментальными данными по фазам развития яровой пшеницы.

1) оптимальная влажность, по [30] (при $w_{ВЗ} = 0,3 w_{ПВ}^*$; $0,84 w_{НВ} = 0,48 w_{ПВ}^*$ всходы—кущение; $0,80 w_{НВ} = 0,37 w_{ПВ}^*$, кущение—выход в трубку; $0,78 w_{НВ} = 0,34 w_{ПВ}^*$, выход в трубку—восковая спелость; $0,73 w_{НВ} = 0,30 w_{ПВ}^*$, восковая спелость—уборка [23]); 2) оптимальные влагозапасы в периоды: всходы—кущение — $160 \text{ мм} = 0,42 w_{ПВ}^*$; кущение—выход в трубку — $160 \text{ мм} = 0,42 w_{ПВ}^*$; формирование колоса и цветка — $110 \text{ мм} = 0,29 w_{ПВ}^*$; цветение—восковая спелость — $80 \text{ мм} = 0,21 w_{ПВ}^*$ [3]; 3) влагозапасы нижней границы оптимального диапазона по периодам: кущение — $0,70 w_{НВ} = 0,36 w_{ПВ}$; стебление—колосшение — $(0,8 \div 0,85) w_{НВ} = (0,45 \div 0,50) w_{ПВ}$; наливание — $(0,6 \div 0,75) w_{НВ} = (0,27 \div 0,40) w_{ПВ}^*$; $w_{ВЗ} = 0,2 w_{ПВ}$, $w_{НВ} = 0,7 w_{ПВ}$; 4) нижняя граница оптимальной влажности (по [15]): $w_{\min} = (0,65 \div 0,70) w_{НВ}$; всходы—кущение — $(0,65 \div 0,7) w_{НВ} = (0,32 \div 0,36) w_{ПВ}$; трубкавание—колосшение — $(0,70 \div 0,75) w_{НВ} = (0,36 \div 0,40) w_{ПВ}$; наливание — $(0,65 \div 0,70) w_{НВ} = (0,32 \div 0,36) w_{ПВ}$; $w_{ВЗ} = 0,2 w_{ПВ}$; $w_{НВ} = 0,7 w_{ПВ}$.

Таблица 16

Оптимальные запасы продуктивной влаги (мм), сложившиеся в естественных условиях в годы с максимальными урожаями яровой пшеницы (Западная Сибирь и Северный Казахстан)

Декада	ω мм	ω^*	Средняя дата наступления фазы				
			фаза	Шортанды		Тобольск	
				50 %	90 %	50 %	90 %
Май							
1	148—196	0,39—0,52	Посев Всходы	17 V	24 V	14 V	22 V
2	144—190	0,38—0,50		24 V	4 VI	24 V	7 VI
3	150—246	0,50—0,65					
Июнь							
1	156—244	0,41—0,64	3-й лист	2 VI	11 VI	6 VI	16 VI
			Кущение	8 VI	20 VI	16 VI	25 VI
2	140—190	0,37—0,50	Выход в трубку	15 VI	25 VI	21 VI	2 VII
3	120—174	0,32—0,46					
Июль							
1	144—200	0,38—0,53	Колошение	7 VII	23 VII	4 VII	15 VII
2	96—120	0,25—0,32	Цветение	13 VII	25 VII	12 VII	23 VII
3	104—130	0,27—0,34	Молочная спелость	24 VII	12 VIII	26 VII	5 VIII
Август							
1	82—113	0,22—0,31	Восковая спелость	10 VIII	4 IX	8 VIII	28 VIII
2	192—234	0,50—0,62					
3	90—122						

Примечание. Расчетный слой 0—100 см; $\omega_{ПВ}^* = 380$ мм.

3.4. Многофакторные требования растений

Выше был рассмотрен метод расчета требований растений к водному режиму. Можно предполагать, что этот метод будет «работать» и для других факторов внешней среды. Расчеты требований растений к температурному режиму показали возможность применения разработанных моделей и методов их идентификации в этом случае. Однако получение требований по другим факторам (в первую очередь по фактору питания) как функции времени вегетации, т. е. $S(f, \tau)$, затруднено из-за отсутствия массового и многолетнего экспериментального

материала. Но все же представляется целесообразным кратко рассмотреть структуру многофакторной модели и функциональные механизмы влияния отдельных факторов на урожай.

Будем полагать, что получены функции $S(w, \tau)$, $S(t, \tau)$, $S(f, \tau)$ требований растений к водному, тепловому и пищевому факторам. В каждый i -тый момент вегетации пространством требований растений можно представить в виде некоторых изооптимальных областей (площадей) в случае двух переменных и в виде изооптимальных объемов в случае трех переменных. Проведенные ранее расчеты по средним за вегетацию требованиям [26] показали, что изооптимальные области $S(w, t, f, \tau) = \text{const}$ имеют форму эллипсоидов. Поэтому получить многомерную степень оптимальности при наличии функции $S(w, t, f, \tau)$ не составит труда. Далее, имея «веса» каждого момента вегетации по данному фактору, можно получить «взвешенную» многомерную степень оптимальности и, осредняя S_i за вегетацию, получить относительные урожаи, т. е. величины $S = U/U_{max}$. Как было показано выше, U_{max} является функцией фотосинтетически активной радиации. Таким образом, зная сложившиеся условия и имея функцию $S(w, t, f)$, можно оценить будущий урожай сразу же после прохождения критических фаз. Более достоверный прогноз урожая можно осуществить на основании долгосрочного прогноза факторов внешней среды при постоянном уточнении конечной величины после получения краткосрочных прогнозов.

Использование многомерных функций $S(\varphi, t)$ в целях оперативного регулирования, по-видимому, громоздко, поэтому можно предложить другую форму использования функций требований растений. Эта форма основана на гипотезе Либиха об определяющем значении фактора, находящегося в минимуме. Тогда можно предположить, что в каждый конкретный момент вегетации растение откликается в первую очередь на регулирование минимального фактора и доля урожая в этот момент определяется степенью оптимальности минимального фактора [формулы (1.14) и (1.15)]. Из этого следует, что расчет прогнозируемых урожаев и регулирование можно осуществлять последовательно, каждый раз определяя и используя в расчетах минимальный фактор. Следует отметить, что минимум отыскивается не по абсолютному значению фактора, а по степени оптимальности его.

На основании зависимостей (1.9) — (1.16) можно записать зависимость для прогноза урожая в виде

$$U = U_{max}(R) \bar{S} = U_{max}(R) \sum_{i=1}^n \eta_i^{(\varphi_{min})} S_i^{(\varphi_{min})}, \quad (3.4)$$

где $U_{max}(R)$ —прогноз максимального урожая как функция солнечной радиации; $\eta_i^{(\varphi_{min})}$ —вклад в урожай i -того момента

по минимальному (ϕ -тому) фактору; $S_i^{(\phi_{\min})}$ —степень оптимальности в i -тый момент времени по минимальному фактору.

Таким образом, рассчитывая требования растений в каждый момент вегетации, можно объективно оценивать будущий урожай в естественных условиях и проводить оптимальное многофакторное регулирование на мелиорируемых землях.

Методы расчетов требований растений, описанные выше, основаны на функциональном подходе, когда весь посев растений рассматривается как единое целое и требования получаются с учетом взаимоотношений в посеве. Однако не менее интересен структурный подход, где на основе анализа отдельных механизмов жизнедеятельности, например фотосинтеза, делаются заключения о промежуточной и конечной продуктивности растения. Если в первом случае продуктивность оценивается по напряженности факторов внешней среды, то во втором она определяется непосредственно самим растением в процессе непрерывного измерения величины фотосинтеза.

РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОГО РЕЖИМА ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Основы расчета режима орошения были заложены академиком А. Н. Костяковым [3, 4] и развиты в работах его учеников и последователей. Отличительной чертой этих расчетов являлось то, что они базировались, с одной стороны, на требованиях растений к влажности почвы, а с другой — на познании процессов формирования ее в различных почвенно-климатических условиях.

Как говорилось выше (главы 1 и 2), дальнейшие работы по уточнению методов расчета режима орошения сельскохозяйственных культур необходимо проводить в направлении уточнения требований растений в каждый момент вегетации и поисков адекватных моделей процессов формирования влажности почвы. Общие вопросы исследования условий внешней среды, в том числе влажности почвы, были описаны в главе 2, конкретные данные по требованиям яровой пшеницы получены в главе 3. Это дает возможность рассчитать режим водообеспеченности пшеницы с более детальным учетом требований растений на основании стохастического прогноза влажности почвы.

4.1. Стохастический прогноз естественных влагозапасов

Как было показано (п. 2.5), влажность почвы в многолетнем разрезе под рассматриваемой сельскохозяйственной культурой может иметь ряд состояний, вероятность перехода из которых в любое другое определяется стохастической матрицей переходных вероятностей (2.6).

В табл. 17 приводятся данные многолетних наблюдений продуктивных влагозапасов под яровой пшеницей. Как видно из этой таблицы, во вторую декаду мая близкие влагозапасы были в 1935 (106 мм), 1943 (109 мм), 1950 г. (105 мм), однако в следующую декаду влажность изменялась по-разному: в 1935 г. она была 77 мм, в 1943 г.— 73 мм, в 1950 г.— 114 мм. Таким образом, из состояния влажности примерно 107 мм она перешла в два существенно различных состояния — примерно

Таблица 17

Запасы продуктивной влаги в слое 0—100 см (мм). Бузулук

Год	Апрель		Май			Июнь			Июль		
	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1935	94	100	121	106	77	70	50	103	87	55	10
1936	105	111	76	85	91	49	42	59	49	60	
1937	210	113	127	117	128	—	—	29	48	47	
1938	179	168	181	169	133	76	85	39	28	33	
1939	118	—	152	155	103	36	42	55	43	25	
1940	195	195	171	209	206	152	106	68	91	38	
1941	—	—	—	—	180	145	114	57	27	45	
1942	—	—	—	174	156	128	96	68	85	70	
1943	151	115	139	109	73	49	45	11	21	15	
1944	—	122	140	88	100	49	41	78	34	—	
1945	96	102	95	134	101	55	33	8	0	15	
1946	—	158	134	145	105	54	38	97	30	48	
1947	119	121	102	85	88	47	13	—	0	14	
1948	—	60	52	46	60	0	0	1	0	—	
1949	180	—	128	123	95	95	52	52	43	22	
1950	—	—	124	105	114	96	60	52	41	38	
1951	121	118	124	141	122	66	34	28	6	37	
1952	51	86	63	44	21	4	7	5	1	35	
1953	100	144	111	113	62	40	15	12	1	1	
1954	82	119	99	89	69	29	0	1	0	1	
1955	60	60	76	59	24	7	6	4	0	—	
1956	77	72	72	42	35	24	4	1	9	21	
1957	167	132	125	93	64	31	15	21	21	16	
1958	197	158	155	135	88	92	26	6	15	2	
1959	98	70	81	52	60	35	12	4	40	—	
1960	136	100	107	89	59	28	7	2	0	0	
1961	75	78	49	58	68	26	12	15	21	23	
1962	106	141	136	62	88	87	69	36	33	—	
1963	145	82	143	120	96	75	71	61	36	—	
1964	—	214	171	159	158	144	106	97	94	137	
1965	162	168	158	145	95	64	41	8	—	—	
1966	126	122	114	94	40	35	31	0	—	—	
1967	30	28	25	23	19	—	—	2	—	—	
1968	92	99	99	71	49	34	18	28	7	—	
1969	29	21	22	27	14	—	1	—	—	—	
1970	129	101	105	73	84	51	43	1	—	12	
1971	168	110	95	84	76	64	49	40	34	26	
1972	108	101	85	48	40	26	3	6	—	—	
1973	150	101	106	117	71	58	26	10	35	34	30
1974	134	160	126	118	111	67	51	16	12	67	30
<i>n</i>	33	35	38	39	40	37	38	39	34	28	2

75 и 114 мм. Проследив за такими переходами от декады к декаде на протяжении всей вегетации, можно установить некоторую закономерность, выражаемую матрицей переходных вероятностей.

Разобьем весь диапазон встречающихся в таблице влажностей на ряд состояний, например шесть:

$$\Delta w_k = (w_{\max} - w_{\min})/n, \quad (4.1)$$

где $n = 6$:

№ состояния ...	1	2	3	4	5	6
Диапазон, мм . .	0—40	40—80	80—120	120—160	160—200	200—240

Матрицу в этом случае можно записать в следующем виде:

$$\|P_{w_{40}}\| = \begin{vmatrix} 0,86 & 0,08 & 0,03 & 0,02 & 0,02 & 0 \\ 0,37 & 0,54 & 0,09 & 0 & 0 & 0 \\ 0,07 & 0,42 & 0,37 & 0,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05 & 0,57 & 0,38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,07 & 0,47 & 0,40 & 0,07 \\ 0 & 0 & 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \end{vmatrix}$$

Матрица является стохастической, так как $P_{ij} \geq 0$ и $\sum_j P_{kj} = 1$, где k — номер строки. (Здесь и далее $\sum_j P_{kj} = 1$ с точностью до 0,01.)

Для проверки регулярности цепи возведем матрицу $\|P_{w_{40}}\|$ последовательно в степени 2, 3, 4 и т. д. Отметим момент, когда все элементы ее будут положительны, т. е. $P_{ij} > 0$. Нетрудно убедиться, что число нулей матрицы уменьшается с 13 при $\|P_{w_{40}}\|^1$ до 0 при $\|P_{w_{40}}\|^7$.

Таким образом, марковский процесс формирования влажности в естественных условиях является регулярным и, следовательно, эргодическим. Граф вероятностей переходов этой матрицы приведен на рис. 18. Этот процесс можно рассматривать как простую однородную цепь Маркова с конечным числом состояний. Необходимо и дальше изучать свойства этого процесса на многочисленном статистическом материале в целях уточнения принятой классификации.

Как было показано (п. 2.5), после расчета переходной матрицы $\|P_w\|$ можно рассчитать вероятности всех состояний в каждый момент времени. Для этого необходимо знать начальное состояние влажности в момент начала вегетации. Предположим, что в первую декаду мая какого-либо года влажность была равна 141 мм, т. е. находилась в четвертом состоянии,

тогда вероятности начальных состояний запишутся как

$$P_1(0) = 0; P_2(0) = 0; P_3(0) = 0; P_4(0) = 1;$$

$$P_5(0) = 0; P_6(0) = 0;$$

и, согласно матрице $\|P_{w_{45}}\|$, после первой декады вероятности перехода влажности в различные состояния будут следующими:

$$P_{41}(1) = 0; P_{42}(1) = 0,05; P_{43}(1) = 0,57;$$

$$P_{44}(1) = 0,38; P_{45}(1) = 0; P_{46}(1) = 0.$$

Это означает, что при начальной влажности 141 мм вероятность появления во второй декаде влажности в диапазоне 0—40 мм равна нулю, влажность в диапазоне 40—80 мм появится лишь в 5 % случаев. Наиболее вероятно снижение влажности до 60—120 мм [$P_{43}(1) = 0,57$]. Вероятность того, что влажность и во вторую декаду останется в том же диапазоне, равна 0,38.

Таким же образом можно рассчитать вероятности любых диапазонов (состояний) влажности при других начальных условиях.

Нетрудно видеть, что, перебирая все возможные начальные состояния и объединяя значения вероятностей в единую матрицу, получим матрицу вероятности влажности во вторую декаду вегетации при любых начальных условиях, которая будет идентична начальной матрице.

Другими словами, для получения матрицы вероятности влажности во вторую декаду мая (порядковый номер декады 1) нужно умножить единичную диагональную матрицу состояний в первую декаду (порядковый номер декады 0) на матрицу переходных вероятностей. Это можно записать в виде

$$P^{(1)} = \|P^{(0)}\| \|P_{w_{45}}\| = \|P_{w_{40}}\| = \begin{vmatrix} 0,86 & 0,08 & 0,03 & 0,02 & 0,02 & 0 \\ 0,37 & 0,54 & 0,09 & 0 & 0 & 0 \\ 0,07 & 0,42 & 0,37 & 0,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05 & 0,57 & 0,38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,07 & 0,47 & 0,40 & 0,07 \\ 0 & 0 & 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \end{vmatrix}$$

так как $\|P^{(0)}\|$ — единичная матрица.

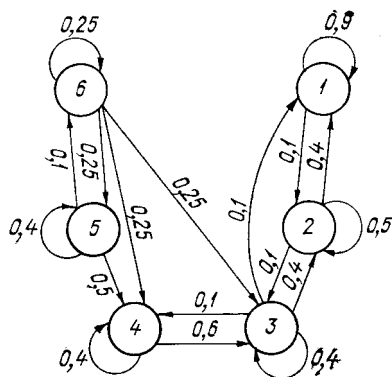


Рис. 18. Граф вероятностей переходов из одного состояния влажности в другое.

Случай для шести состояний; градации через 40 мм продуктивных влагозапасов.

По аналогии можно предположить, что матрица вероятностей влажности в третью декаду мая будет равна произведению матрицы вероятностей влажности во вторую декаду на матрицу переходных вероятностей, т. е.

$$\|P^{(2)}\| = \|P^{(1)}\| \cdot \|P_{w,0}\|.$$

Продолжая подобные рассуждения, можно получить рекуррентную формулу, в которой каждая последующая матрица состояний получается путем умножения предыдущей на переходную:

$$\|P^{(k)}\| = \|P^{(k-1)}\| \cdot \|P_w\|.$$

Так как $\|P(1)\| = \|P_w\|$, далее $\|P^{(2)}\| = \|P^{(1)}\| \cdot \|P_w\| = \|P_w\|^2$ и т. д., получим $\|P^{(k)}\| = \|P_w\|^k$. Матрица вероятности состояний в k -тую декаду равна k -той степени матрицы переходных вероятностей.

Опираясь на это правило, можно легко подсчитать стохастические матрицы состояний влажности в любую декаду. Так, в четвертую декаду матрица вероятностей состояний будет равна $\|P^{(4)}\| = \|P_w\|^4$, в пятую $\|P_w\|^5$, или $\|P_w^{(3)}\|^2$, и т. д.

Конкретный вид матриц состояний и соответствующих им графов естественных условий влажности для пункта Бузулук (табл. 17) в третью, пятую и девятую декады вегетации будет следующим:

$$\|P^{(3)}\| = \begin{vmatrix} 0,71 & 0,15 & 0,07 & 0,04 & 0,02 & 0 \\ 0,59 & 0,27 & 0,09 & 0,03 & 0,01 & 0 \\ 0,37 & 0,34 & 0,20 & 0,08 & 0 & 0 \\ 0,18 & 0,35 & 0,32 & 0,15 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,19 & 0,33 & 0,29 & 0,08 & 0,06 \\ 0,08 & 0,21 & 0,34 & 0,26 & 0,09 & 0,03 \end{vmatrix}$$

$$\|P^{(5)}\| = \begin{vmatrix} 0,65 & 0,18 & 0,10 & 0,05 & 0,02 & 0 \\ 0,62 & 0,22 & 0,10 & 0,04 & 0,01 & 0 \\ 0,52 & 0,27 & 0,14 & 0,06 & 0,01 & 0 \\ 0,41 & 0,31 & 0,19 & 0,08 & 0,01 & 0 \\ 0,24 & 0,31 & 0,28 & 0,15 & 0,02 & 0,01 \\ 0,27 & 0,30 & 0,26 & 0,14 & 0,02 & 0,01 \end{vmatrix}$$

$$\|P^{(9)}\| = \begin{vmatrix} 0,61 & 0,20 & 0,11 & 0,05 & 0,02 & 0,01 \\ 0,61 & 0,20 & 0,11 & 0,05 & 0,02 & 0,01 \\ 0,60 & 0,22 & 0,11 & 0,05 & 0,02 & 0,01 \\ 0,58 & 0,23 & 0,12 & 0,05 & 0,01 & 0,01 \\ 0,53 & 0,25 & 0,14 & 0,06 & 0,01 & 0,01 \\ 0,53 & 0,25 & 0,14 & 0,06 & 0,01 & 0,01 \end{vmatrix}$$

Соответствующие графы переходов вероятностей приведены на рис. 19.

Таким образом, начиная с любого начального состояния влажности можно построить подекадное ее изменение в течение вегетации. Для этого рассмотрим матрицы переходов влажностей по декадам. Начиная с первой матрицы найдем наиболее вероятное установившееся состояние. Используя его в качестве начального условия и рассматривая матрицу переходов во вторую декаду, найдем следующее наиболее вероятное состояние влажности, соответствующее второй декаде вегетации. Подобным образом можно получить величины влажностей для всего периода вегетации.

Как говорилось выше, возможные траектории изменения влажности во времени для начальной влажности 133 мм (вторая декада апреля 1963 г.) можно представить в виде графика стохастического прогноза влажности. Выбирая траекторию по наибольшим вероятностям, можно показать, что во вторую и третью декады влажность будет находиться в диапазоне 80—120 мм, а начиная с четвертой декады она понизится до 0—40 мм. Более подробно построение графика стохастического прогноза влажности описано в [6].

Прогноз на следующую декаду существенным образом может уточняться при известной влажности на конец текущей декады. Уточнение может быть также достигнуто путем увеличения числа состояний до 10 или 20.

Как отмечалось, в матрицах вероятностей состояний $\|P^{(1)}\|$, $\|P^{(3)}\|$, $\|P^{(5)}\|$, $\|P^{(9)}\|$ с увеличением времени замечается тенденция выравнивания значений вероятностей в столбцах и стремление их к предельным значениям. Предельную матрицу можно определить, учитывая, что процесс изменения влажности непрерывный, и составив дифференциальные уравнения изменения вероятности состояний во времени. Для рассматриваемого примера с матрицей переходных вероятностей $\|P_{40}\|$ они запишутся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} dP_1/dt &= -0,08P_1 + 0,37P_2, \\ dP_2/dt &= -0,09P_2 + 0,42P_3, \\ dP_3/dt &= -0,14P_3 + 0,57P_4, \\ dP_4/dt &= -0,001P_4 + 0,47P_5, \\ dP_5/dt &= -0,07P_5 + 0,25P_6, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Предельное состояние определится условиями $dP/dt = 0$, тогда эта система дифференциальных уравнений превращается

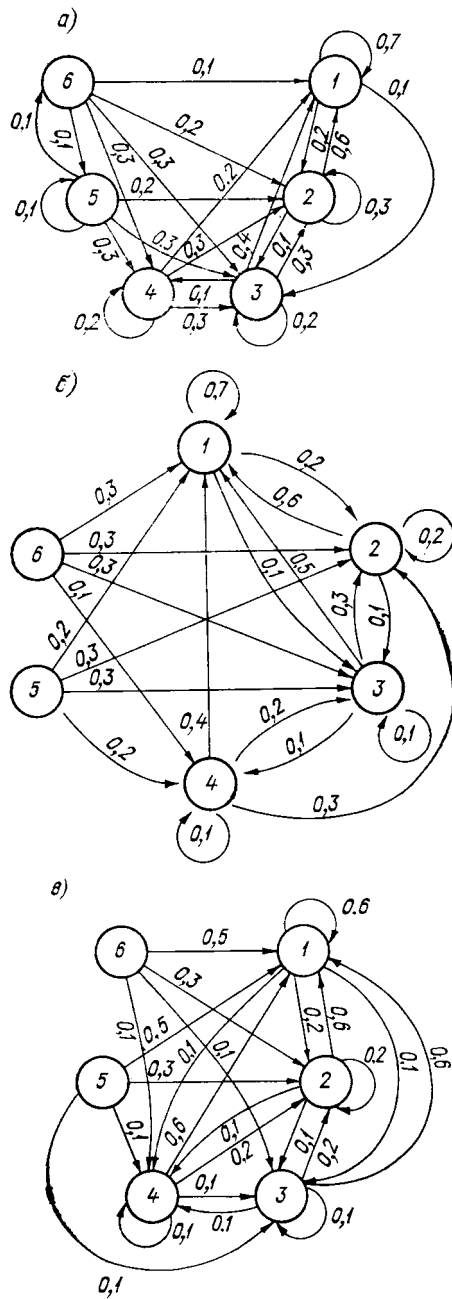


Рис. 19. Графы вероятностей естественного состояния продуктивных влагозапасов в метровом слое почвы.

а) 3-я декада вегетации, б) 5-я декада, в) 9-я декада.

в систему алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -0,08P_1 + 0,37P_2 &= 0, \\ -0,09P_2 + 0,42P_3 &= 0, \\ -0,14P_3 + 0,57P_4 &= 0, \\ -0,001P_4 + 0,47P_5 &= 0, \\ -0,07P_5 + 0,25P_6 &= 0, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Решение такой системы дает следующие значения компонент неподвижного вероятностного вектора в предельной матрице:

$$\{P_{ij}\} = \{0,61; 0,21; 0,11; 0,05; 0,02; 0,001\}. \quad (4.4)$$

При составлении системы (4.2) было сделано допущение, что плотности вероятностей перехода от одной декады к другой численно равны соответствующим элементам переходной матрицы $\|P_4\|$. Справедливость этого предположения можно проверить, рассчитав неподвижный вектор другим способом.

Так, согласно [2], существует единственный вероятностный вектор $\{\Pi\}$ такой, что $\{\Pi\|P\| = \{\Pi\}$, где $\|P\|$ матрица переходных вероятностей. Тогда можно записать:

$$\{P_1P_2P_3P_4P_5P_6\} \left\| \begin{array}{cccccc} 0,86 & 0,08 & 0,03 & 0,02 & 0,02 & 0 \\ 0,37 & 0,54 & 0,09 & 0 & 0 & 0 \\ 0,07 & 0,42 & 0,37 & 0,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05 & 0,57 & 0,38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,07 & 0,47 & 0,40 & 0,07 \\ 0 & 0 & 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \end{array} \right\| = \\ = \{P_1P_2P_3P_4P_5P_6\}. \quad (4.5)$$

Уравнение (4.5) можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} 0,86P_1 + 0,37P_2 + 0,07P_3 &= 0, \\ 0,08P_1 + 0,54P_2 + 0,42P_3 + 0,05P_4 &= 0, \\ 0,03P_1 + 0,09P_2 + 0,37P_3 + 0,57P_4 + 0,07P_5 + 0,25P_6 &= 0, \\ 0,02P_1 + 0,014P_3 + 0,38P_4 + 0,47P_5 + 0,25P_6 &= 0, \\ 0,02P_1 + 0,40P_5 + 0,25P_6 &= 0, \\ 0,07P_5 + 0,25P_6 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

Для того чтобы эта система имела нетривиальное решение, выразим одно из неизвестных системы, например P_6 , через все остальные неизвестные, используя соотношение

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1.$$

Нетрудно убедиться, что решение системы (4.6) будет тождественно вектору строке $\{P_i\}$ (4.6).

Таким образом, предельная матрица вероятностей состояний влажностей $\|P_{ij}\|$ будет иметь следующий вид:

$$\|P_{ij}^\infty\| = \begin{pmatrix} 0,61 & 0,21 & 0,11 & 0,05 & 0,02 & 0,001 \\ & & & \vdots & & \\ & & & & \vdots & \\ & & & & & \vdots \\ 0,61 & 0,21 & 0,11 & 0,05 & 0,02 & 0,001 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Отметим, что вероятности состояний в этой матрице можно интерпретировать как относительное время пребывания в них. Согласно (4.7), получим: в 61 году из 100 средняя за вегетацию влажность будет 0—40 мм, в 21 году 40—80 мм, в 11 годах 80—120 мм, около года она будет 120—160 мм и т. д. Исходя из эргодичности процессов, эти соотношения, по-видимому, сохранятся и на протяжении вегетации.

Подводя итог этой части работы, следует отметить, что в первом приближении можно прогнозировать влажность как краткосрочно, на основе расчета стохастических траекторий в каждую декаду, так и долгосрочно, на основе матрицы предельных состояний.

4.2. Расчет предельных влагозапасов и дефицитов влажности почвы

Обработка экспериментальных данных изменения влагозапасов во времени приводит к выводу, что для различных географических зон влагозапасы $w(\tau)$ сначала интенсивно уменьшаются, а потом сравнительно медленно приближаются к некоторому предельному (стационарному) значению [1, 5]. А. И. Будаговский на основании эксперимента показал, что изменение влажности во времени (при испарении) может быть описано кривой вида

$$w = \exp(-\alpha\tau),$$

где w_0 — нормированные влагозапасы; τ — время.

Для ненормированных величин можно записать

$$w = w_\infty \pm \exp(-\alpha\tau), \quad (4.8)$$

где w_∞ — предельная влажность, которая зависит от почвы, растения и климата.

Очевидно, что при $\tau \rightarrow \infty$ $w = w_\infty$.

Физический смысл величины w_∞ таков—при каких бы начальных влажностях ни начиналась вегетация, через некоторое время влажность будет стремиться к некоторому равновесному состоянию, которое будет стабильно (в многолетнем

разреze) для данной культуры и почвенно-грунтовых условий. Следует подчеркнуть, что предельное состояние является корректной характеристикой только в естественных условиях.

Таким образом, w_∞ является некоторой комплексной характеристикой почвы, климата и растения.

Найти величину w_∞ можно как произведение матрицы предельных состояний $\|P^\infty\|$ или неподвижного вектора-строки $\{\Pi\}$ на вектор-столбец $\{w\}$ начальных влагозапасов, т. е.

$$w_\infty = \{P_1^{(\infty)} P_2^{(\infty)} P_3^{(\infty)} P_4^{(\infty)} P_5^{(\infty)} P_6^{(\infty)}\} \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_{II} \\ w_{III} \\ w_{IV} \\ w_V \\ w_{VI} \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

Подставив соответствующие значения, получим

$$w_\infty = \sum P_i^\infty w_i \approx 46 \text{ мм}$$

в единицах продуктивных влагозапасов в метровом слое почвы.

Таким же способом можно рассчитать предельные дефициты влагозапасов, только в этом случае вектор-строку $\{\Pi\}$ нужно умножить на вектор-столбец дефицитов влагозапасов в каждом состоянии влажности $\{\Delta_w\}$. Элементы вектора $\{\Delta_w\}$ будем искать из соотношения:

$$\Delta w_i = w_i - \bar{w}_{\text{opt}},$$

где

$$w_i = (w'_i + w''_i)/2,$$

w'_i — нижний предел влажности в i -том состоянии; w''_i — верх-

ний предел влажности в i -том состоянии; \bar{w}_{opt} — оптимальная влажность, средняя за вегетацию для заданной обеспеченности радиацией (ФАР) [5].

Тогда математическое ожидание дефицита влагозапасов будет равно

$$\Delta w = \{P_1^{(\infty)} P_2^{(\infty)} P_3^{(\infty)} P_4^{(\infty)} P_5^{(\infty)} P_6^{(\infty)}\} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta w_1 \\ \Delta w_2 \\ \Delta w_3 \\ \Delta w_4 \\ \Delta w_5 \\ \Delta w_6 \end{Bmatrix}, \quad (4.10)$$

или
$$\Delta w = \sum_{i=1}^6 P_i^\infty \cdot \Delta w_i \approx 68 \text{ мм}.$$

4.3. Расчет изменения математического ожидания влагозапасов во время вегетации

Для расчета изменения влагозапасов во время вегетации, когда исходная информация представлена в виде влагозапасов только в первую декаду, можно воспользоваться процедурой последовательных умножений влажности в i -тую декаду на матрицу переходных вероятностей влагозапасов от i -той декады к $(i + 1)$ -й декаде.

В общем виде такая процедура запишется как рекуррентное соотношение

$$\{\omega_{(i)}^j\} \| P \|^i = \omega_{(i+1)}^j, \quad (4.11)$$

где $\omega_{(i)}^j$ — влагозапасы при начальном j -том состоянии в i -тую декаду; $\|P\|^i$ — i -тая степень матрицы вероятностей переходов.

Для первой декады это можно выразить как произведение вектора-строки влагозапасов на матрицу вероятностей состояний в первую декаду:

$$\{\omega_{(0)}^I \omega_{(0)}^{II} \omega_{(0)}^{III} \omega_{(0)}^{IV} \omega_{(0)}^V \omega_{(0)}^{VI}\} \cdot \begin{vmatrix} P_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & P_{16} \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & P_{33} & & \cdot \\ & & & & \cdot & \\ P_{61} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & P_{66} \end{vmatrix} = \\ = \{\omega_{(1)}^I \omega_{(1)}^{II} \omega_{(1)}^{III} \omega_{(1)}^{IV} \omega_{(1)}^V \omega_{(1)}^{VI}\}. \quad (4.12)$$

Далее вектор-строка $\{\omega_{(1)}^I \omega_{(1)}^{II} \omega_{(1)}^{III} \omega_{(1)}^{IV} \omega_{(1)}^V \omega_{(1)}^{VI}\}$ умножается на матрицу переходных вероятностей от первой декады ко второй. Выше было установлено, что матрица переходных вероятностей в любую декаду с номером k может быть получена как k -тая степень исходной матрицы переходных вероятностей. Поэтому для расчета влагозапасов необходимо вычислить последовательные степени матрицы $\|P\|$. Таким образом, можно получить матрицы вероятности состояний до 11-й декады вегетации.

Подставив теперь в (4.11) значения матриц, получим изменение влажности во время вегетации.

Результаты вычислений приводятся в табл. 18.

По данным табл. 18 строим график (рис. 20). Интересно, что влажность изменяется по убывающей кривой, которую качественно можно описать зависимостью вида (4.8). Кроме того, к началу седьмой декады вегетации независимо от начального состояния влажность становится практически равной $\omega_{(\infty)}$.

Таблица 18

Изменение влажности во время вегетации при различных начальных состояниях $w_{(0)}$

$w_{(0)}$	$w_{(1)}$	$w_{(2)}$	$w_{(3)}$	$w_{(4)}$	$w_{(5)}$	$w_{(6)}$	$w_{(7)}$	$w_{(8)}$	$w_{(9)}$	$w_{(10)}$	$w_{(\infty)}$
20	30	40	45	46	46	46	46	46	46	46	46
60	50	44	45	46	46	46	46	46	46	46	46
100	83	60	49	46	46	46	46	46	46	46	46
140	113	77	53	47	46	46	46	46	46	46	46
180	159	110	66	49	47	46	46	46	46	46	46
220	160	106	65	49	47	46	46	46	46	46	46

Следует отметить также, что при начальной влажности $w_{(0)} < w_{(\infty)}$ происходит увеличение влагозапасов до $w_{(\infty)}$. Следовательно, для любой сельскохозяйственной культуры, произра-

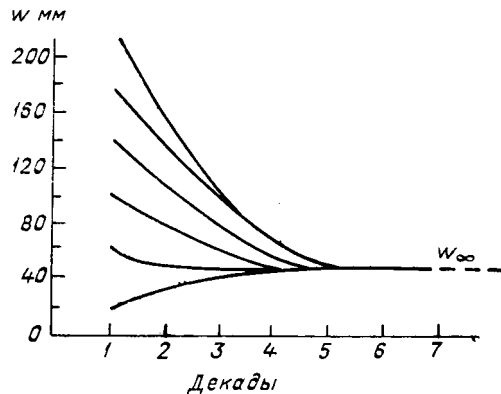


Рис. 20. Изменение влагозапасов почвы во время вегетации в зависимости от начального состояния влажности.

стающей в данном географическом пункте, можно дать долгосрочный прогноз ¹ математического ожидания влагозапасов при любом начальном распределении влажности. Использование более мелких градаций (например, через 20 мм) увеличит размерность матрицы переходных состояний, но не изменит хода расчета и величины предельной влажности.

Имея математическое ожидание $w_{(\infty)}$ и матрицу $\|P_{\infty}\|$, нетрудно рассчитать величину предельной влажности различной

¹ Здесь понятие «долгосрочный прогноз» используется автором как возможность расчета будущих значений влажности во все декады вегетации по известной начальной влажности. — Прим. ред.

интегральной вероятности (обеспеченности). Для этого необходимо вычислить дисперсию или среднее квадратическое отклонение.

Этот расчет можно выполнить по следующей формуле:

$$\sigma_{w_{\infty}} = \sqrt{\sum P (w_{\infty})^2 - w_{\infty}^2}.$$

Величины предельных влагозапасов в метровом слое различной вероятности в предположении, что закон распределения близок к нормальному, будут равны:

$$w_{10} \% = 30 \text{ мм}; w_{25} \% = 37 \text{ мм}; w_{75} \% = 57 \text{ мм};$$

$$w_{90} \% = 62 \text{ мм}.$$

Перед тем как перейти к рассмотрению вопроса о краткосрочном прогнозе, остановимся на одном вспомогательном, но очень важном расчете.

4.4. Расчет изменения влагозапасов Δw внутри декадного периода

Вектор-столбец изменения влагозапасов $\{\Delta w\}$ в конце $i+1$ -й декады можно вычислить по формуле

$$\{\Delta w_{i+1}\} = \{w_{i+1}\} - \{w_i\}.$$

Естественно предположить, что величина изменения влагозапасов отражает не только процессы поступления осадков и испарения, но и в определенной степени переток влаги ниже расчетного слоя, интенсивность которого существенным образом зависит от величины влажности. Испарение же зависит от влажности начиная с определенной величины $w_{кр}$ [1], для рассматриваемых условий она равна 46 мм. В то же время перетоки в более глубокие слои при малых влажностях ($w < 46$ мм) малы по сравнению с испарением. Чтобы оценить влияние этих факторов на величины изменения влагозапасов, построим график зависимости Δw от влажности (рис. 21). При существенном влиянии на ход процесса интенсивности испарения (т. е. номера декады) на графике получим серию кривых, на которых каждому изменению влагозапасов соответствует влажность предыдущей декады.

Вследствие того, что точки на графике лежат довольно плотно и их расположение практически не зависит от номера декады, можно провести одну осредняющую все точки прямую (5), задаваемую следующим уравнением:

$$\Delta w = \Delta w_0 + kw - 14,5 - 0,36_w. \quad (4.13)$$

Строго говоря, для первых декад прямые будут иметь меньший угол наклона и поэтому проведение одной общей для всех декад прямой $\Delta W(w)$ должно привести к повышению ошибок в диапазоне высоких влажностей. Однако в первом приближении можно пойти на такое допущение.

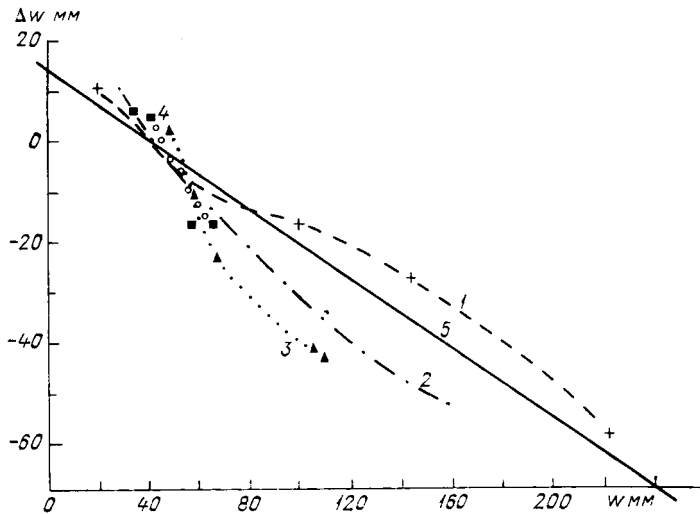


Рис. 21. Зависимость изменения влагозапасов за декаду Дш от влажности w .

1, 2, 3, 4 — кривые, характеризующие ход влажности в соответствующую декаду; 5 — осредненная линия.

Для расчета изменения влагозапасов внутри декадного периода можно использовать уравнение вида ¹

$$dw/d\tau = A - k(\tau)w, \quad (4.14)$$

где A — интенсивность подтока влаги в корнеобитаемый слой при $w = 0$; w — текущее значение влагозапасов; τ — время; $k(\tau)$ — угловой коэффициент зависимости $w' = f(w)$.

Расчеты, проведенные по ряду географических пунктов, показали, что $k(\tau_1) \approx k(\tau_2) \dots = \text{const}$, т. е. значения коэффициента k во время вегетации меняются мало, поэтому уравнение (4.14) можно записать в виде

$$dw/d\tau = A - kw. \quad (4.15)$$

¹ В общем случае уравнение (4.14) имеет более сложную форму, так как второй член в правой части равенства существенно нелинеен при малых ($w \rightarrow 0$) и больших ($w > w_{HB}$) влажностях. Однако и в этом случае влажность во времени меняется экспоненциально и в целях упрощения ее можно рассчитывать по уравнению (4.14).

Решением этого уравнения при начальных условиях $\tau = 0$, $w = w_{\text{НВ}}$, где $w_{\text{НВ}}$ — влажность при наименьшей влагоемкости, будет выражение

$$\begin{aligned} w &= w_0 + (w_{\text{НВ}} - w_0) e^{-k\tau}; \text{ при } w < w_0 \\ w &= w_0(1 - e^{-k\tau}); \text{ при } 0 < w < w_0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

где w_0 — равновесная для данной почвы влажность.

Если в начальный момент влажность отличалась от $w_{\text{НВ}}$, то в показателе степени $\ln k(w_{\text{НВ}} - w_0) - k\tau$ значение $w_{\text{НВ}}$ заменяется значением влажности в начальный момент.

Для определения времени следующего полива можно рассчитать время, когда влажность w станет равной критической предполивной влажности $w_{\text{кр}}$ по формуле

$$\tau = \ln \frac{w_{\text{НВ}} - w_0}{w_{\text{кр}} - w_0} / k. \quad (4.17)$$

Выражение (4.17) имеет смысл при $w_{\text{кр}} > w_0$.

Теперь, когда есть возможность рассчитать изменение влажности во времени от одной водоподачи до другой, можно приступить к расчету режима орошения.

4.5. Расчет режима орошения с учетом изменения требований растений в течение вегетации и краткосрочного прогноза режима влажности

Порядок расчета

1. Для года заданной вероятности солнечной радиации (ФАР) выбираем функцию $S(w, t)$ (глава 3).

2. В соответствии с водно-физическими характеристиками почвы (полная влагоемкость и наименьшая влагоемкость) рассчитываем, снимаем с графиков или находим по таблице (подобной табл. 13) w_i ($S \approx 1$) для каждой декады. На рис. 22 показана истинная кривая $w_{\text{опт}}(\tau)$ для $P = 75\%$ и для упрощения расчетов сглаженная кривая (линия 3).

3. На основании измерения или прогноза определяем предпосевную влажность w_0 .

4. Определяем поливную норму как $m_i = w_i(S \approx 1) - w_{i-1}$ т. е. от оптимальной в данную декаду влажности вычитаем влажность на конец предыдущей декады. Иногда бывает выгодно, чтобы послепосевная влажность была больше оптимальной влажности, т. е.

$$w_0 > w(S = 1).$$

5. Изменение влагозапасов после полива определяем по уравнению

$$w = w_0 + \frac{1}{k} \exp [\ln k (w_{\text{нв}} - w_0) - k\tau].$$

6. При отклонении w от w_{opt} вычисляем поливную норму и по уравнению (4.17) находим время следующего полива. Далее расчет повторяем до момента восковой спелости пшеницы.

7. Сумма поливных норм m_i дает оросительную норму для данного уровня фотосинтетически активной радиации.

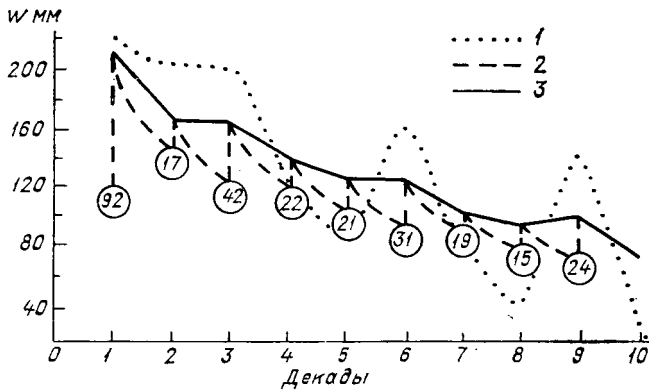


Рис. 22. Расчет режима орошения.

Цифры в кружках — декартные дефициты влагозапасов; 1 — изменение оптимальной влажности $P_0=75\%$ (мягкие сорта), 2 — изменения влажности во время вегетации после полива, 3 — сглаженная кривая оптимальной влажности.

Связь между оросительной нормой M и влагозапасами можно выразить в следующем виде:

$$M = M_{\text{opt}} \frac{w - w_0}{w_{\text{opt}} - w_0}, \quad (4.18)$$

где M_{opt} — биологически оптимальная оросительная норма; w_{opt} — биологический оптимум почвенной влаги.

А влажность почвы при заданной оросительной норме можно рассчитать по формуле

$$w = \frac{M}{M_{\text{opt}}} (w_{\text{opt}} - w_0) + w_0. \quad (4.19)$$

4.6. Зависимость относительного урожая от оросительной нормы

Для оценки влияния оросительных норм на величину урожая или на степень оптимальности по водному режиму воспользуемся зависимостью, связывающей относительный урожай с влажностью почвы (1.8):

$$S(w)_{(\tau_i)} = \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{\gamma w_{opt}} \left(\frac{1-w}{1-w_{opt}} \right)^{\gamma (1-w_{opt})},$$

и зависимостью, связывающей влажность почвы с оросительной нормой (4.19). Объединив их, получим уравнение связи между относительным урожаем (продуктивностью сельскохозяйственной культуры) и оросительной нормой нетто:

$$S = \left[\frac{(w_{opt}^* - w_0) \frac{M}{M_{opt}} + w_0}{w_{opt}^*} \right]^{\gamma^* w_{opt}^*} \times \left\{ \frac{1 - \left[(w_{opt}^* - w_0) \frac{M}{M_0} + w_0 \right]}{1 - w_{opt}^*} \right\}^{\gamma^* (1 - w_{opt}^*)}, \quad (4.20)$$

здесь w_{opt}^* — эффективная оптимальная влажность за период вегетации; γ^* — эффективный коэффициент саморегулирования.

Величины w_{opt}^* и γ^* получаются при осреднении требований растений к условиям внешней среды за вегетационный период [п. 1.5, формула (1.12)].

Для примера приводим функцию $S(M)$, рассчитанную для станции Бузулук (табл. 19).

Таблица 19

Зависимость относительной продуктивности от оросительной нормы

$S(w_{cp})$	0,37	0,52	0,82	0,93	0,95	0,94	0,93	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80
$M(w_{cp})$	0	189	261	333	425	518	610	702	794	887	979	1071

Как видно из табл. 19, наибольшая оптимальность по водному режиму 0,95 достигается при оросительной норме 425 мм. Любое дальнейшее увеличение оросительной нормы приводит к снижению степени оптимальности. Наибольший интерес представляет левая ветвь кривой (значения, находящиеся слева от $S = 0,95$ в табл. 19). Так, например, из ее анализа следует, что при снижении уровня оптимальности на 2 % т. е. с 0,95 до 0,93, соответствующая оросительная норма уменьшается с 425 мм до 333 мм, т. е. почти на 22 %. При снижении степени опти-

мальности до 0,82, т. е. на 13%, оросительная норма уменьшается на 40 % и составляет всего 261 мм. Подобное свойство зависимости степени оптимальности по водному режиму от оросительной нормы позволяет найти наиболее экономичные оросительные нормы, исключив экономически необоснованный расход воды, получающийся при незнании формы зависимости $S(m)$.

Расчеты, подобные приведенным выше, были сделаны для гидрометстанций Домбаровский, Карталы, Бреды, Ясногорский, Медведевская, Пономаревский, Уйский, Чебеньки, Октябрьское, Богданович (табл. 20).

Таблица 20

Сравнение оросительных норм различной степени оптимальности

Станция	$M(S=1)$ мм	Расходы воды по Алпатьеву, мм	$M(S=0,8)$ мм	$\frac{M(S=0,8)}{M(S=1,0)}$
Богданович	195	328	10	—
Бродокалмак	379	339	—	—
Опытный	214	242	10	—
Мирный	299	386	96	0,32
Петропавловский	555	368	264	0,48
Карталы	393	458	150	0,38
Бреды	380	443	180	0,47
Домбаровский	495	525	280	0,57
Октябрьское	368	440	266	0,72
Чебеньки	356	490	234	0,66
Фадеевский	353	400	180	0,51
Бузулук	425	414	256	0,60
Ясногорский	445	420	264	0,59
			Среднее	0,53

Полученные результаты, связывающие степень оптимальности по водному режиму $S(w)$ и оросительные нормы M для условий предыдущего примера ($P_U = 75\%$, сглаженная функция $S(w, \tau)$ и т. д.), показаны на рис. 23. Нетрудно убедиться, что хотя оптимальная оросительная норма, соответствующая наибольшей степени оптимальности, различна, форма зависимости сохраняется и в районе оптимума относительный прирост оросительной нормы приблизительно одинаков. Оросительные нормы при $S = 1$ приближаются к величинам водопотребления, вычисленным по формуле Алпатьева через сумму дефицитов влажности воздуха (величины $M(S)$ в среднем на 50 мм меньше величин водопотребления) В силу ярко выраженной куполообразной формы кривых оросительные нормы, большие, чем

¹ Расчеты проведены Н. А. Байбаевой

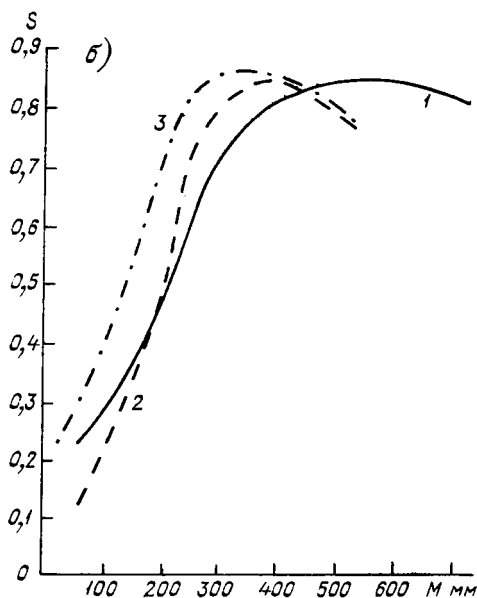
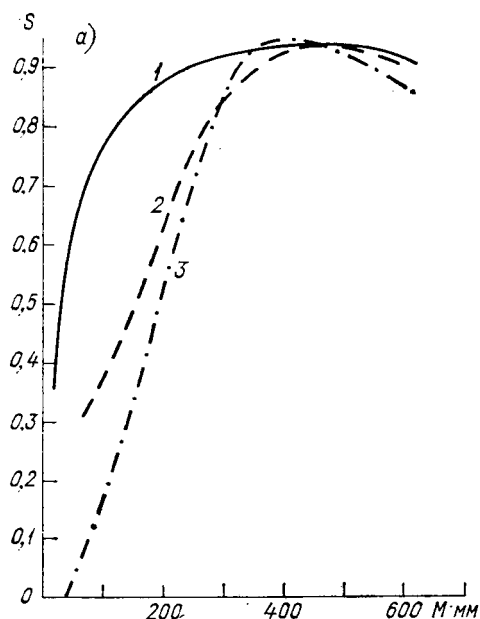


Рис. 23. Зависимость S от оросительной нормы M

а) 1 — Бреды, Челябинская область; Оренбургская область: 2 — Ясногорский, 3 — Октябрьское;
 б) Оренбургская область: 1 — Домбаровка, 2 — Чепеньки, 3 — Фадеевский совх.

оптимальные, приводят к снижению оптимальности, а следовательно, и к снижению урожаев. При снижении степени оптимальности на 20 % оросительная норма снижается в среднем на 50 % (последняя графа в табл. 20).

Таким образом, появляется возможность экономного выбора поливной нормы, оптимизирующей затраты на полив.

Второй путь экономии заключается в учете относительной значимости каждой из декад на выход продукции. В этом случае появляется возможность оптимально перераспределить оросительную воду во время вегетации и подавать ее в наиболее критические периоды.

В главе 3 было показано, что «вклады» различных декад в урожай не равноценны. Поэтому поливные нормы можно оценивать дифференцированно. Наибольшее значение имеют фазы кущение—колошение—налив зерна. Неоптимальные условия в начальный период вегетации меньше сказываются на конечном урожае, поэтому можно после предпосевного влагозарядочного полива вплоть до 4-й декады вегетации поливов не проводить. В этом случае часть воды экономится. Расчеты, проведенные для ряда пунк-

тов, показали, что коэффициент экономии воды, равный отношению дифференцированной нормы орошения к полной, в этом случае может изменяться от 0,12 (Чебеньки) до 0,34 (Карталы) (Петропавловский — 0,32; Бреды — 0,28; Домбаровский — 0,28; Ясногорский — 0,18). Таким образом можно экономить 20—25 % воды за счет использования ее в более критические фазы. Падение урожая при этом, которое можно подсчитать на основании данных, приведенных на рис. 23, составит 10—15 %.

4.7. Эффективность оросительных норм, рассчитанных по биоклиматическому и тепловодобалансовому методам

Широко используемые в практике методы расчета оросительных норм (УкрНИИГиМ и ГГИ), к сожалению, не дают возможности оценить их эффективность, т. е. те урожаи, которые могут быть получены при прочих оптимальных условиях в случае орошения. Предполагается, что рассчитанная оросительная норма дает биологически оптимальный урожай, хотя это в большинстве случаев не соответствует действительности.

На основе изложенной выше методики была проведена оценка эффективности оросительных норм, принятых в «Технико-экономическом обосновании переброски сибирских рек в Среднюю Азию» на основе расчетов по биоклиматическому методу (УкрНИИГиМ), и оросительных норм, полученных по тепловодобалансовому методу [7].

Для расчетов были выбраны территории, где необходимость и эффективность орошения яровой пшеницы не являются очевидными: Медведевская и Богдановичи Свердловской области; Мирный, зерносовхоз (Уйский, ГМС) и Карталы Челябинской области; Шадринск Курганской области.

На рис. 24 показаны зависимости относительной продуктивности от оросительной нормы для лет 50 и 75 %-ной обеспеченности. Сюда же нанесены значения оросительных норм при вегетационных поливах с влагозарядкой и без нее, которые были рассчитаны по методике УкрНИИГиМ¹.

Результаты расчетов сведены в табл. 21, в которой также приведены средние многолетние величины недостатков водопотребления $d_{E50}\%$ яровой пшеницы за период вегетации, рассчитанные по тепловодобалансовому методу для двух пунктов [7, с. 286]. Из таблицы видно, что рассчитанные оросительные нормы для года 50 %-ной обеспеченности при проведении только вегетационных поливов дают продуктивность не ниже 70-% (0,7) от потенциального урожая сорта (Шадринск) и не менее

¹ Расчеты были выполнены Союзгипроводхозом.

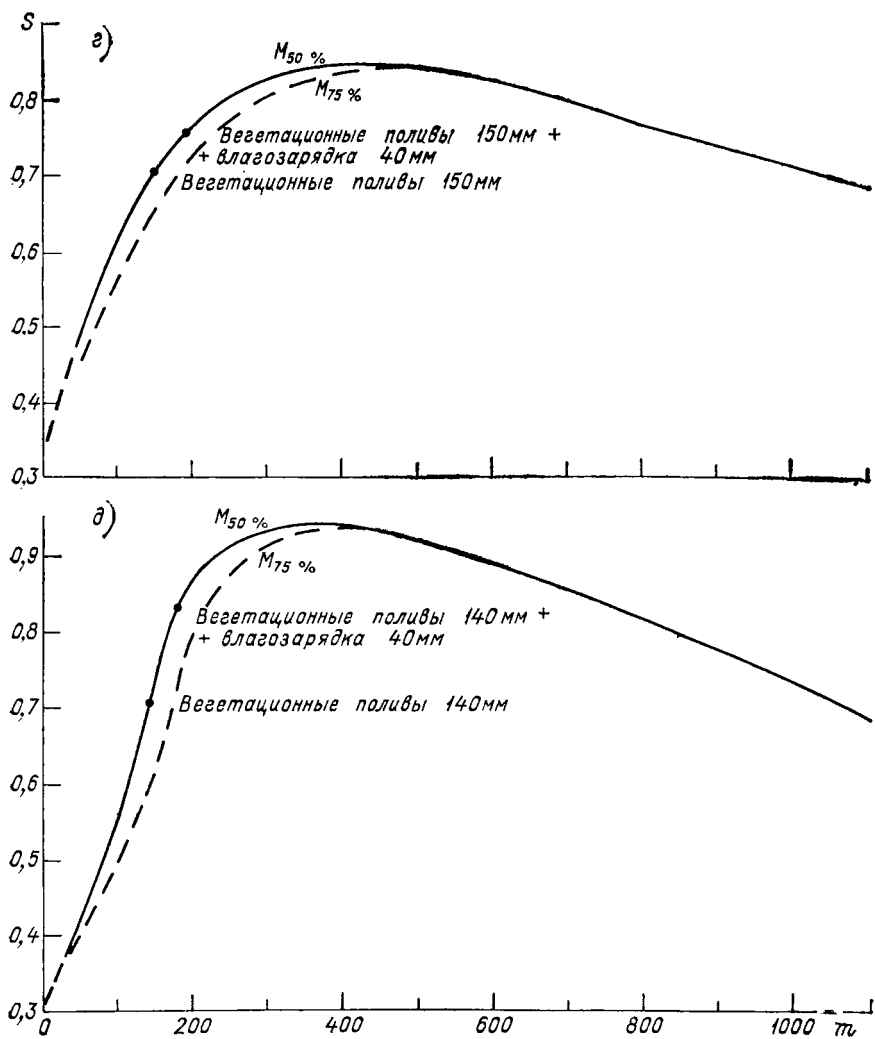


Рис. 24. Зависимость относительной продуктивности от оросительной нормы для лет 50 и 75 %-ной обеспеченности.

Свердловская область: а) Медведевская (Опытная), б) Богдановичи; Челябинская область: в) Уйский (Мирный, зерносовхоз), г) Каргалы; Курганская область: д) Шадринск

Таблица 21

Относительная продуктивность S при орошении яровой пшеницы
для лет различной обеспеченности

Стация	Вегетационные поливы, мм		Вегетационный полив + вла- гозарядка, мм		Вегета- ционные поливы, мм	Вегетацион- ные поливы + влагоза- рядка, мм	dE_{50} %, мм	Примечания
	M_{50} %	M_{75} %	M_{50} %	M_{75} %				
	M_{50} %	M_{75} %	M_{50} %	M_{75} %	M_{75} %	M_{75} %		
Курганская об- ласть Шадринск	0,70	0,60	0,83	0,74	140	180	~150	
	0,86	0,83	0,90	0,88	117	157		
Челябинская об- ласть Уйский (Мир- ный, зерносов- хоз)	0,80	0,75	0,86	0,82	150	190	~180	Оросительные нор- мы взяты по ст. Верхотурье — 36 км восточнее Медведовской
	0,90	0,89	—	—	80	—		
Свердловская об- ласть Медведовская (Опытный)	0,92	0,91	—	—	116	—		Оросительные нор- мы взяты по ст. Свердловск — 75 км восточнее Богдановичей
Богдановичи	0,84	0,8	0,86	0,81				
Ср								

60 % (0,6) для года 75 %-ной обеспеченности. При условии влагозарядки относительная продуктивность повышается соответственно до 83 и 74 %. В среднем по рассматриваемым районам продуктивность принятых оросительных норм, рассчитанных по методике УкрНИИГиМ и тепловодобалансовому методу, находится на уровне 80 % от максимального урожая. Это убедительно показывает, что в рассматриваемом случае широко используемые в настоящее время методы расчета дают высокоэффективные оросительные нормы.

Для количественной оценки величин прибавки урожая и необходимости орошения следует определить естественную (природную) относительную продуктивность S яровой пшеницы для различных районов, которая может быть получена по графикам рис. 23 и 24 (точка пересечения кривой $S(M)$ с осью ординат). Данные по естественной продуктивности S_0 приведены в табл. 22.

Таблица 22

Естественная (природная) относительная продуктивность S_0 яровой пшеницы для различных районов

Станция	S_0
Курганская область	
Шадринск	0,30
Челябинская область	
Уйский (Мирный, зерносовхоз)	0,37
Карталы	0,44
Бреды	<0,30
Свердловская область	
Медведевская (Опытный)	0,82
Богдановичи	0,80
Оренбургская область	
Ясногорский	<0,30
Фадеевский, зерносовхоз	0,27
Домабаровка	0,20
Чебеньки	0,10
Октябрьская	<0,10

Они позволили определить, что в ряде районов (Свердловская область $S \geq 0,8$) в орошении нет необходимости, так как увеличение урожая незначительно. В районах Челябинской и Оренбургской областей естественная продуктивность весьма низкая ($S \approx 0,1 \div 0,3$). Следовательно, в этих районах эффективность орошения будет достаточно высокой. Коэффициенты увеличения урожая при орошении приведены в табл. 23 (графа

Таблица 23

Коэффициенты увеличения урожая η при орошении в год 75 % обеспеченности и средней год при полном и ущемленном режиме

Станция	Год 75%-ной обеспеченности			Год 50%-ной обеспеченности			S_0
	$S(M_{75} \%)$	$S(M_{75} \% - 30 \text{ мм})$	$S(M_{75} \% - 60 \text{ мм})$	$S(M_{50} \%)$	$S(M_{75} \% - 30 \text{ мм})$	$S(M_{75} \% - 60 \text{ мм})$	
	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
Курганская область, Шадринск	2,46	2,07	1,83	2,77	2,43	2,10	0,30
Челябинская область, Уйский (Мирный, зерносовхоз)	2,37	2,24	2,11	2,43	2,35	2,24	0,37
Карталы	1,86	1,73	1,61	1,95	1,86	1,73	0,44
Свердловская область, Медведовская (Опытный)	1,08	1,06	1,02	1,10	1,07	1,04	0,82
Богдановичи	1,14	1,11	1,09	1,15	1,14	1,10	0,80

Таблица 24

Влияние недостаточного водообеспечения (пропуск одного или двух поливов) на относительную продуктивность яровой пшеницы

Районы	Относительная продуктивность при полном и недостаточном водообеспечении						Полная оросительная норма с учетом влагозарядки, мм
	полная оросительная норма $S(M_{50} \%)$	без одного полива $S_1(M_{50} \% - 30 \text{ мм})$	без двух поливов $S_2(M_{50} \% - 60 \text{ мм})$	полная оросительная норма $S(M_{75} \%)$	без одного полива $S_1(M_{75} \% - 30 \text{ мм})$	без двух поливов $S_2(M_{75} \% - 60 \text{ мм})$	
Курганская область, Шадринск	0,83	0,73	0,63	0,74	0,62	0,55	180
Челябинская область, Уйский (Мирный, зерносовхоз)	0,90	0,87	0,83	0,88	0,83	0,78	157
Карталы	0,86	0,82	0,76	0,82	0,76	0,71	190
Свердловская область, Медведовская (Опытный)	0,90	0,88	0,85	0,89	0,87	0,84	80
Богдановичи	0,92	0,91	0,88	0,91	0,89	0,87	116

} Влагозарядка не проводится

Примечание. $M_{50} \%$ означает, что поливы проводились в год 50 %-ной обеспеченности полной нормой, т. е. рассчитанной на год 75 %-ной обеспеченности.

$S_{M75\%}/S_0$ и $S_{M50\%}/S_0$). По данным расчетов, для пунктов Уйский, Карталы, Шадринск можно ожидать увеличения урожаев по сравнению с существующим уровнем в 1,9—2,8 раза. Прибавки урожаев в приведенных пунктах Свердловской области составляют 8—15 %, что, видимо, делает неэффективным развитие орошения в этом районе.

Определенное влияние на продуктивность растений может оказывать ущемление режима орошения, т. е. пропуск одного или двух поливов по 30 мм. В табл. 24 приведены данные расчетов относительной продуктивности при ущемленном режиме орошения, которые показывают, что пропуск одного полива в год 50 %-ной обеспеченности снижает относительную продуктивность на 4—10%; в год 75 %-ной обеспеченности — на 6—12%. Пропуск двух поливов снижает урожай на 10—20%. В районах, где естественная продуктивность высокая, ущемление режима орошения практически не сказывается на урожае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методы расчета требований растений к условиям внешней среды в каждую декаду вегетации. На основании выполненных расчетов установлено, что для получения максимального урожая необходимо точное следование оптимальной траектории изменения влажности почвы. При поддержании постоянных влагозапасов максимальный урожай получить нельзя.

Для практических целей рассчитаны параметры математической модели, связывающей относительные урожаи с продуктивными влагозапасами в почве [формула (3.2)]:

$$S(\omega) = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{opt}}} \right)^{\gamma \omega_{\text{opt}}} \left(\frac{1-\omega}{1-\omega_{\text{opt}}} \right)^{\gamma(1-\omega_{\text{opt}})}$$

2. Установлена возможность и разработана методика расчета влажности почвы стохастическими методами. Для практических расчетов изменение влажности за декаду можно определить по формуле (4.16):

$$\omega = \omega_0 + \frac{1}{k} \exp [\ln k (\omega_{\text{HB}} - \omega_0) - k\tau],$$

а время между поливами — по формуле (4.17):

$$\tau = \ln \frac{\omega_{\text{HB}} - \omega_0}{\omega_{\text{кр}} - \omega_0} / k.$$

3. Разработана методика расчета проектного режима орошения на основе зависимостей продуктивности от фактора (3.2) и изменения влагозапасов во времени (4.16), позволяющая оценить недобор урожая в случае ущемления оросительных норм.

4. Найдена функциональная зависимость относительного урожая от оросительной нормы [формула (4.20)]:

$$S = \left[\frac{(\omega_{\text{opt}}^* - \omega_0) \frac{M}{M_{\text{opt}}} + \omega_0}{\omega_{\text{opt}}^*} \right]^{\gamma^* \omega_{\text{opt}}^*} \times \\ \times \left\{ \frac{1 \left[(\omega_{\text{opt}}^* - \omega_0) \frac{M}{M_{\text{opt}}} + \omega_0 \right]}{1 - \omega_{\text{opt}}^*} \right\}^{\gamma^* (1 - \omega_{\text{opt}}^*)},$$

позволяющая определять оптимальные оросительные нормы.

5. Выполнен расчет эффективности оросительных норм, полученных по методике УкрНИИГиМ и ГГИ, и показано, что в среднем по рассматриваемым районам продуктивность посева при орошении этими нормами будет на уровне 80 % от максимального урожая. Поэтому можно считать, что расчеты ороси-

тельных норм, выполненные этими методами, удовлетворяют требованию создания довольно высокой продуктивности посева при орошении. Однако при разработке технико-экономических обоснований для различных районов страны целесообразно рассчитывать уровень эффективности проектного режима орошения, используя описанную в монографии методику МГМИ.

6. Показано, что высокая эффективность орошения характерна не для всех рассматриваемых районов. Так, если для Челябинской области (Уйский, Карталы) и Курганской области (Шадринск) можно ожидать увеличения урожая в 1,9—2,8 раза, то в Свердловской области прибавки урожаев от орошения составят 8—15 %, что делает неэффективным развитие орошения в этом районе.

7. Показано, что пропуск одного вегетационного полива снижает урожай на 4—12%, а двух поливов — на 10—20%. Однако пропуск поливов в начальный период вегетации при наличии предпосевного влагозарядкового полива даст меньшее снижение продуктивности, но существенно (на 20—25 %) позволит сэкономить оросительную воду.

Список литературы

К главе 1

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей.—М.: Наука, 1964.— 567 с.
2. Г а л я м и н Е. П. О построении динамической модели формирования урожая агроценозов.— В кн.: Биологические системы в земледелии и лесоводстве. М.: Наука, 1974, с. 70—83.
3. Л а й с к А., М о л д а у Х. и др. Моделирование продукционного процесса растительного покрова.— Бот. журн., 1971, т. 56, № 6, с. 761—776.
4. М о л д а у Х. А. Оптимальное распределение ассимилятов при дефиците воды (математическая модель).— Изв. АН ЭССР, сер. биол., 1975, т. 24, № 1, с. 3—9.
5. Рашевский Н. Модели и математические принципы в биологии.— В кн.: Теоретическая и математическая биология. М.: Мир, 1968, с. 48—66.
6. Р о с с Ю. К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова.— Л.: Гидрометеоздат, 1975.— 342 с.
7. С и р о т е н к о О. Д. Предпосылки построения комплексной динамической модели «погода—урожай».— Труды ИЭМ, 1978, вып. 3(40), с. 18—31.
8. С к а з к и н Ф. Д. Критический период у растений по отношению к недостатку воды в почве.— Л.: Наука, 1971.— 119 с.
9. Т о о м и н г Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая.— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 200 с.
10. Х в а л е н с к и й Ю. А., С и р о т е н к о О. Д. Методика расчета фотосинтеза посевов сельскохозяйственных культур на основании стандартных метеорологических данных.— Труды ИЭМ, 1973, № 3(40), с. 32—42.
11. Ш а б а н о в В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций.— Л.: Гидрометеоздат, 1973.— 165 с.

К главе 2

1. А в е р ь я н о в С. Ф. Некоторые вопросы предупреждения засоления орошаемых земель и мера борьбы с ними в Европейской части СССР.— В кн.: Орошаемое земледелие в Европейской части СССР. М.: 1965, с. 41—52.
2. Б о н д а р е н к о Н. Ф. Физика движения подземных вод.— Л.: Гидрометеоздат, 1973.— 215 с.
3. Г р и г о р ь е в А. А. Проблема взаимообмена веществ и энергии в литосфере, гидросфере и атмосфере и ее значение в общей теории физической географии.— Изв. АН СССР, сер. геогр., 1952, № 4.
4. Г р и г о р ь е в А. А. Закономерности строения и развития географической среды.— М.: Мысль, 1966.— 382 с.
5. Г р о о т С. Р. Термодинамика необратимых процессов. Пер. с англ.— М.: Гостехиздат, 1956.— 275 с.
6. И с с л е д о в а н и е процессов обмена энергией и веществом в системе почва—растение—воздух.— Л.: Наука, 1972.— 190 с.

7. К е м е н и Д ж., С н е л Д ж., Томпсон Д ж. Введение в конечную математику.— М.—Л.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963.— 483 с.
8. Куртнер Д. А., Чудновский А. Ф. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте.— Л.: Гидрометеоздат, 1969,—299 с.
9. Л ы к о в А. В. Теоретические основы строительной теплофизики.— Минск; Изд-во АН БССР, 1961.— 519 с.
10. Мен жулин Г. В. К методике расчета метеорологического режима в растительном сообществе.— Метеорология и гидрология, 1970, № 2, с. 92—99.
11. Н е р п и н С. В., Чудновский А. Ф. Физика почв.— М.: Наука, 1967,— 583 с.
12. Н е р п и н С. В., Чудновский А. Ф. Энерго- и массообмен в системе растение—почва—воздух. Л.: Гидрометеоздат, 1975.— 357 с.
13. П р и г о ж и н И. Введение в термодинамику необратимых процессов. Пер. с англ.— М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.— 127 с.
14. Р о з е н б р о к Х., Сторн С. Вычислительные методы для инженеров-химиков.— М.: Мир, 1968.— 442 с.
15. Садыков Б. С. Вывод универсальной формулы для произвольных кинетических коэффициентов.— Журн. физ. химии, 1969, т. 43, № 3, с. 593—597.
16. Тейлор С. А., Кэрн Д ж. В. Анализ одномерных потоков воды и тепла или электричества с помощью термодинамики необратимых процессов.— В кн.: Термодинамика почвенной влаги. Л.: Гидрометеоздат, 1966, с. 361—370.
17. Термодинамика необратимых процессов.— М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962.— 421 с.
18. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения.. Т. 1.—М.: Мир, 1967,—398 с.
19. Хил ь м и Г. Ф. Основы физики биосферы.— Л.: Гидрометеоздат, 1966,—299 с.
20. Ч у д н о в с к и й А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах.— Л.: Гостехиздат, 1954.— 444 с.
21. Ш у л ь г и н И. А. Растение и солнце.—Л.: Гидрометеоздат, 1973.— 250 с.

К главе 3

1. А г р о ф и з и ч е с к и е характеристики почв нечерноземной зоны Азиатской части СССР.— М.: Колос, 1978.— 280 с.
2. Астапов С. В., Шишков К- Н. Водный режим почв при орошении яровой пшеницы на типичных и карбонатных черноземах.— В кн.: Орошение с.-х. культур в центрально-черноземной полосе РСФСР, вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
3. В е р и г о С. А., Р а з у м о в а Л. А. Почвенная влага.— Л.: Гидрометеоздат, 1973.— 313 с.
4. Г о л ь ц б е р г И. А. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР.— Л.: Гидрометеоздат, 1961.
5. Долгов С. И. Исследование подвижности почвенной влаги и ее доступность для растений.— М.—Л.: Изд. АН СССР, 1948.
6. Е ф и м о в а Н. А. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова.— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 200 с.
7. З а й ц е в К. Н. Режим орошения яровой пшеницы в Заволжье.— Докл. ВАСХНИЛ, 1940, вып. 19.

8. Иванов П. К. Биологические особенности к урожай.— В кн.: Высокие урожаи яровой пшеницы. М.: Колос, 1975, с. 8—20.
9. Карбышева А. Д. Агрогидрологические свойства почв Казахской ССР.— Алма-Ата, 1964.
10. Климов А. А., Устенко Г. П., Листопад Г. Е. Программирование урожая.— Волгоград, 1971.—540 с.
11. Мещанинова Н. Б. Агрометеорологическое обоснование орошения зерновых культур.— Л.: Гидрометеоздат, 1971.
12. Михайлов М. Н. Возделывание орошаемых культур в Поволжье.— М.: Сельхозгиз, 1952.
13. Мосиенко Н. А. Агрогидрологические основы орошения в степной зоне.— Л.: Гидрометеоздат, 1972.— 197 с.
14. Насатовский А. И. Пшеницы.— М.: Колос, 1965.— 563 с.
15. Петин Н. С. Физиология орошаемой пшеницы.— М.: Изд-во АН СССР, 1959.
16. Пивоварова З. И. О временной структуре рядов сумм солнечной радиации разного масштаба осреднения.— Труды ГГО, 1974, вып. 307, с. 3—19.
17. Пшеницы СССР. Под ред. П. М. Жуковского.— М.—Л., Сельхозгиз, 1957.
18. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1.— Л., Гидрометеоздат, 1965.— 638 с.
19. Сенников В. А., Сляднев А. П. Агроклиматические ресурсы Юго-Востока Западной Сибири и продуктивность зерновых культур.— Л.: Гидрометеоздат, 1972.— 140 с.
20. Сказкин Ф. Д. Критический период у растений по отношению к недостатку воды в почве.— Л.: Наука, 1971.— 107 с.
21. Соколов Б. С. Справочник агрогидрологических свойств почв Омской и Тюменской областей.—Л.: Гидрометеоздат, 1968.
22. Справочник агронома Сибири.— М.: Колос, 1978.— 523 с.
23. Технические условия и нормы проектирования осушительных систем БССР.— Минск, 1970.— 330 с.
24. Фокеев П. М. Яровая пшеница при орошении в Заволжье.— Советская агрономия, 1951, № 3.
25. Черникова М. И., Кузьмина Л. Н. Агрогидрологические свойства почв юго-восточной части Западной Сибири.— Л.: Гидрометеоздат, 1965,—266 с.
26. Шабанов В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций.— Л.: Гидрометеоздат, 1972.— 160 с.
27. Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР.— М.: Колос, 1967.— 329 с.
28. Шебеко В. Ф. Гидрологический режим осушаемых территорий — Минск: Урожай, 1970.— 292 с.
29. Шульгин А. М. Климат почвы и его регулирование.—Л.: Гидрометеоздат, 1967.— 281 с.
30. Янголь А. М. Увлажнение осушаемых болот в условиях Украинской ССР.—Автореф. докт. дис. М.: 1967.

К главе 4

1. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги.— М.: Наука, 1964,—233 с.
2. Кемени Дж., Снелл Дж., Томпсон Дж. Введение в конечную математику.— М., Изд-во иностр. лит-ры, 1963.— 483 с.

3. Костяков А. Н. Основы мелиорации/—М.: Сельхозгиз, 1960.— 622 с.
4. Костяков А. Н. Избранные труды. Т. 2.— М.: Сельхозгиз, 1961.— 743 с.
5. Ш а б а н о в В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций.— Л.: Гидрометеониздат, 1973.— 160 с.
6. Ш а б а н о в В. В. Применение цепей Маркова в расчете режима орошения.— В кн.: Применение системного анализа в ирригации и дренаже. М.: Наука, 1976, с. 54—76.
7. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель.— Л.: Гидрометеониздат, 1975.— 371 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора	3
Предисловие	5
Введение	7
Глава 1. Требования растений к условиям внешней среды	9
1.1. Некоторые основные принципы и законы биологии, необходимые для расчета требований растений	9
1.2. Требования к моделям и основные экспериментальные факты для построения моделей	12
1.3. Постановка задач и формулирование целей исследований требований растений	14
1.4. Некоторые однофакторные модели для фиксированных моментов времени	20
1.5. Модели осреднения требований растений к условиям внешней среды за вегетационный период	23
1.6. Методика расчета требований яровой пшеницы к режиму влажности почвы	26
Глава 2. Исследования процессов формирования комплекса условий внешней среды	33
2.1. Введение	33
2.2. Уравнения баланса	34
2.3. Уравнения движения	37
2.4. Система задач при исследовании закономерностей формирования факторов внешней среды	39
2.5. Некоторые стохастические методы описания закономерностей формирования условий внешней среды	45
Глава 3. Расчет требований яровой пшеницы к режиму влажности почвы	50
3.1. Анализ урожайности яровой пшеницы	50
3.1.1. Картирование урожаев яровой пшеницы по госсортоучасткам	53
3.1.2. Связь урожаев на госсортоучастках с хозяйственными урожаями	62
3.1.3. Анализ многолетних данных по фазам развития яровой пшеницы	64
3.1.4. Интегральные вероятности распределения урожайностей	65
3.2. Анализ условий произрастания яровой пшеницы	66
3.2.1. Повреждение растений весенними и осенними заморозками	66
3.2.2. Режим влажности почвы под яровой пшеницей ...	66
3.2.3. Оценка суммарного расхода воды посевом яровой пшеницы	78

3.3. Расчет требований твердых и мягких сортов яровой пшеницы к режиму влажности почвы	82
3.3.1. Расчет осредненных за вегетацию требований растений к условиям среды	97
3.4. Многофакторные требования растений	105
Глава 4. Расчет необходимого режима влагообеспеченности яровой пшеницы	108
4.1. Стохастический прогноз естественных влагозапасов	108
4.2. Расчет предельных влагозапасов и дефицитов влажности почвы	116
4.3. Расчет изменения математического ожидания влагозапасов во время вегетации	118
4.4. Расчет изменения влагозапасов Дш внутридекадного периода 120	
4.5. Расчет режима орошения с учетом изменения требований растений в течение вегетации и краткосрочного прогноза режима влажности	122
4.6. Зависимость относительного урожая от оросительной нормы 124	
4.7. Эффективность оросительных норм, рассчитанных по биоклиматическому и тепловодобалансовому методам	127
Заключение	134
Список литературы	136

Виталий Владимирович Шабанов

ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И ЕЕ РАСЧЕТ

Редактор А. Б. Котиковская. Художественный редактор В. В. Быков. Художник Ю. Н. Чигирев. Техн. редактор Г. В. Ивкова. Корректор Л. Б. Лаврова. ИБ-1370. Сдано в набор 12.05.81. Подписано в печать 19.08.81. М-13769. Формат 60X×90^{1/16}. Бум. тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 9,0. Кр.-отг. 9,25. Уч.-изд. л. 9,64. Тираж 1610 экз. Индекс АЛ-126. Заказ № 152. Цена 1 р. 50 к. Гидрометеиздат. 199053, Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.

КНИГА ВЫШЛА В СВЕТ

Е. П. Галямин «Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении».
Л. Гидрометеоздат. 1981 г. 3 р. 10 к.

Автор — д-р техн. наук, зав. лабораторией моделирования и оптимизации агрэкосистем ВНИИ гидротехники и мелиорации.

В книге излагаются принципы и методы оптимального распределения водных ресурсов при эксплуатации оросительных систем в условиях их дефицита. Описаны методы получения и переработки информации в оросительной системе, разработана математическая модель формирования урожая агробиоценоза как объекта управления. Формирование урожая сельскохозяйственных культур рассматривается в зависимости от факторов внешней среды и генетических свойств вида и сорта. Приводится пример выбора оптимального режима орошения в условиях дефицита оросительной воды с учетом складывающейся погодной и хозяйственной обстановки.

Книга предназначена для мелиораторов, агрометеорологов, агроэкологов, гидрологов, специалистов сельского хозяйства.

Адрес нашего специализированного магазина: 197101, Ленинград, Большой проспект, 57, магазин № 15 Ленкниги.

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ

ГОТОВИТСЯ К ВЫПУСКУ в 1982 г.

Монография М. Г. Санояна «Агрометеорологические и агрофизические принципы и методы управления влагообеспеченностью посевов». Объем 20 л., ориентировочная цена 3 р. 40 к. (в пер.).

Автор — канд. физ.-мат. наук.

В книге содержится физико-статистический подход к проблеме анализа и прогноза влагообеспеченности сельскохозяйственного поля, т. е. почвы и посева, выращиваемого на ней. Формулируются основные принципы теплового и водного балансов, рассматриваются автоматизированные технические устройства и приборные установки, позволяющие оперативно и в доступном виде реализовать принципиальные положения и основанные на них методы управления влагообеспеченностью посевов. Экспериментально проверяется и оценивается точность и надежность теоретических предпосылок и их технических реализаций в практике проектных и производственных организаций по эксплуатации мелиоративных оросительных систем.

Книга адресована специалистам в области сельскохозяйственной мелиорации, агрометеорологии, гидрофизики почв.

Предварительный заказ Вы можете сдать в магазин местного книготорга или прислать в наш специализированный магазин: 197101, Ленинград, Большой проспект, 57, магазин № 15 Ленкниги.

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ