

На правах рукописи

УДК 631.6

ШАБАНОВ

Виталий Владимирович

*Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
профессор*

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ
НЕОБХОДИМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРАМИ ЖИЗНИ
РАСТЕНИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ
МЕЛИОРАЦИЯХ**

**Специальность 06.01.02. - Мелиорация
и орошаемое земледелие**

ДИССЕРТАЦИЯ

*на соискание ученой степени
доктора технических наук
в форме научного доклада*

МОСКВА 1992

**МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

УДК 631.6

ШАБАНОВ

*Виталий Владимирович
Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
профессор*

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ
НЕОБХОДИМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРАМИ ЖИЗНИ
РАСТЕНИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ
МЕЛИОРАЦИЯХ**

Специальность 06.01.02 - мелиорация
и орошаемое земледелие

ДИССЕРТАЦИЯ

*на соискание ученой степени
доктора технических наук
в форме научного доклада*

Москва - 1992

Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного Знамени
гидромелиоративном институте.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, академик РАСХН

Маслов Б.С.

доктор технических наук, профессор

Шебеко В.Ф.

доктор географических наук, профессор

Клиге Р.К.

Ведущая организация: Российский научно-исследовательский институт
гидротехники и мелиорации.

Защита диссертации в форме научного доклада состоится 23 марта 1992 года
в часов на заседании Специализированного совета К-120.16.02. в
Московском ордена Трудового Красного Знамени гидромелиоративном
институте по адресу: 127550, Москва. ул. Прянишникова, д.19, ауд. 201/1.

С диссертацией в форме научного доклада можно ознакомиться в библиотеке
института.

Автореферат разослан 21.05.1992 года.

Отзывы в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью, просьба
направлять в адрес Специализированного совета.

Ученый секретарь Специализированного совета,
кандидат технических наук, профессор

Берген Р.И.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящий научный доклад обобщает результаты двадцатилетних исследований автора в области комплексного регулирования факторов жизни растений. За этот период при непосредственном участии автора разработаны общие концепции комплексных мелиораций, создана и успешно функционирует Проблемная лаборатория по разработке теоретических основ совместного управления водным, солевым и тепловым режимами на мелиорируемых землях, создана и постоянно совершенствуется автоматизированная опытно-производственная система комплексного мелиоративного регулирования в совхозе "Лесное" Минской обл. БССР. Ряд основных положений, разработанных автором, вошел в обосновывающие материалы, бассейновые и региональные схемы "Комплексного использования водных и земельных ресурсов", отражены в Концепциях развития комплексных мелиораций СССР и РСФСР.

Методические подходы и инженерные приемы расчетов опубликованы в монографиях, руководствах и статьях. Они использовались при решении научных проблем, поставленных заданиями координационных планов ГКНТ СССР, в формировании которых в течение IX - XII пятилеток автор принимал активное участие. Основные концепции и результаты работ вошли в учебник и отражены в курсах "Комплексное использование и охрана водных ресурсов", "Экологические основы мелиорации и водного хозяйства", а также в различных курсах факультета повышения квалификации инженеров-гидротехников в МГМИ.

Актуальность проблемы.

Высокая стоимость мелиоративных работ и ограниченные ресурсы для их осуществления делают необходимым тщательный, научно обоснованный

выбор направления мелиоративного регулирования и прогноза его эффективности, на основании которого должен осуществляться выбор очередности строительства объектов мелиорации и состав мелиоративных мероприятий по реконструкции существующих систем.

Разработка методов обоснования необходимости комплексных мелиораций, под которыми понимается целенаправленное регулирование водного, пищевого и теплового режимов, была начата в IX пятилетке и продолжена в X-ой в соответствии с Государственным планом по решению научно-технической проблемы 0.52.01. - "Разработать рациональные методы и технологические основы управления водно-воздушным, солевым, пищевым и тепловым режимами почво-грунтов, обеспечивающие в дальнейшем переход к комплексному регулированию факторов жизни растений в целях получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур на мелиорируемых землях в основных природных зонах страны", задание 01.04.Н1 и 02.05.Н1.

В одиннадцатой пятилетке эти вопросы ставятся еще более остро, это нашло отражение в целевой программе Ц.0.34.-"Повышение эффективности мелиорируемых земель и использования водных ресурсов в мелиорации", задания 04 и 07, где продолжались исследования по разработке методов комплексного мелиоративного регулирования, оптимизации процессов управления комплексом факторов жизни растений от разработок до внедрения на опытно-производственных мелиоративных системах комплексного регулирования.

Двенадцатая пятилетка как бы завершает определенный этап развития комплексных мелиораций переходом к внедрению таких систем. Так, в государственной научно-исследовательской программе 0.52.01. - "Создать и

внедрить высокопроизводительные мелиоративные системы и технологические процессы их строительства, повысить эффективность использования мелиорируемых земель и водных ресурсов в мелиорации" выделены два пункта - 01.08.Н - "разработать и внедрить системы комплексного регулирования факторов жизни растений", и 01.09.Т - "Создать и ввести в эксплуатацию автоматизированные опытные мелиоративные системы комплексного регулирования факторов жизни растений".

Системы комплексного мелиоративного регулирования не только существенно повышает эффективность мелиорируемых земель, но и являются природоохранными, так как управляют выносом питательных веществ и дают возможность экономить водные ресурсы. При этом удельные затраты основных ресурсов на единицу продукции сокращаются. Вместе с тем возможность более эффективного и природоохранного функционирования может быть наиболее полно реализована только в условиях автоматизации систем комплексного регулирования факторов жизни растений. Это приводит к повышению стоимости систем, а в ряде случаев может сделать капитальные вложения в мелиорацию неэффективными. Отсюда возникает задача научного обоснования природной необходимости, социально-экономической эффективности и экологической допустимости комплексных мелиораций.

Для решения поставленных задач необходима разработка количественных методов обоснования природной необходимости, экономической и социальной эффективности и экологической безопасности комплексных мелиораций, которые могут использоваться для принятия плановых решений на различных стадиях.

Цель исследований:

Разработать количественные методы обоснования необходимости и эффективности проведения как однофакторных (водных, тепловых и т.п.) мелиораций, так и многофакторных (комплексных), позволяющих на основании широкодоступной информации (данные госсортоучастков, метеостанций и опытных научно-исследовательских станций и участков) провести количественный анализ изменения по территории показателей необходимости и эффективности мелиораций, а также разработать методы расчета режимов мелиоративного регулирования, позволяющие оптимизировать (минимизировать) затраты ресурсов на единицу продукции.

Для решения основных задач необходимо было решить ряд подзадач, наиболее крупные из которых следующие:

- разработка принципов комплексного мелиоративного регулирования;
- составления общей схемы исследований по комплексному мелиоративному регулированию и определение в ней места обоснования необходимости и эффективности комплексных мелиораций;
- разработка системы задач по описанию закономерностей изменения требований растений к условиям внешней среды;
- разработка математических моделей изложения требований биоты к условиям внешней среды в процессе вегетации;
- разработка математических моделей формирования факторов внешней среды, а для гидромелиораций в первую очередь продуктивных влагозапасов в почве;
- разработка математических моделей обоснования необходимости мелиораций;
- разработка математических моделей многофакторной типизации отдельных территорий;
- разработка методов идентификации моделей системы растение - среда;

- разработка методов получения зависимостей типа эффект - ресурс (в частности продуктивность сельскохозяйственных культур - оросительная норма);
- обобщение результатов многолетних полевых исследований и использование их для оценки адекватности моделей.

Объекты исследований.

Обоснование необходимости и эффективности проводилось для ряда районов зоны неустойчивого увлажнения. В частности, обоснование необходимости гидротермических мелиораций для культуры картофеля было проведено на центральной и северной частях ЕТС и в районе Якутска Якутской АССР.

Обоснование необходимости мелиораций водно-солевого режима черноземов проводилось для районов Западной Сибири.

Обоснование эффективности орошения яровой пшеницы было выполнено для районов Зауралья и Западной Сибири. Мелкомасштабное обоснование необходимости и эффективности совместного управления водным, пищевым и тепловым режимами было проведено для котловины озера Неро Ярославской обл.(площадь массива 20 тыс.га.).

Экспериментальные исследования проводились на опытном участке Проблемной лаборатории МГМИ в совхозе "Лесное" Минской обл. БССР с 1964 по 1990 год под методическим и научным руководством и при непосредственном участии автора.

Методология и методика исследований.

Основой методологии настоящей работы явилось рассмотрение мелиоративного регулирования как целостного процесса, формирующего

урожай сельскохозяйственной культуры под воздействием основных факторов жизни растений: водного, пищевого, теплового и радиационного.

Основным инструментом такой методологии служит математическое моделирование реальных процессов.

Конструирование математических моделей осуществлялось с учетом особенностей процессов формирования условий внешней среды, в связи с чем большинство из них имеют стохастический характер.

Проверка адекватности отдельных моделей была выполнена на независимой информации, полученной в полевых условиях на опытном участке Проблемной лаборатории МГМИ, и информации из литературных источников.

Проверка работоспособности всей системы моделей проводилась в конкретных расчетах по различным районам путем экспертных оценок и сравнения с результатами идентичных расчетов, полученными другими методами.

Точность расчетов показателей необходимости мелиораций и других водных величин оценивалась статистическими методами.

Оценка типичности опытного участка "Лесное", по данным которого была оценена адекватность некоторых моделей, осуществлялась методами вероятностей многофакторной классификации, разработанными автором.

Научная новизна заключается в разработке новых перспективных методов решения задач количественного обоснования комплексных мелиораций, на основе которых доказывалась возможность повышения эффективности использования мелиорируемых земель и водных ресурсов.

В частности, разработаны:

- система задач и даны принципиальные направления развития комплексного мелиоративного регулирования;
- оригинальные математические модели системы растение-среда;
- стохастические методы расчета показателей необходимости мелиораций;
- методы оценки оптимальности условий по территории для данной культуры;
- методы расчета оптимальных режимов орошения, позволяющие получить аналитические зависимости между продуктивностью и оросительной нормой;
- методы многофакторной типизации мелиорируемых земель, позволяющие распространять оптимальные режимы регулирования опытно-производственных участков на большие территории.
- методы оценки антропогенного влияния на природные системы.

Обоснованность научных положений представленных к защите, подтверждена хорошим соответствием результатов теоретических и многолетних натурных данных, полученных рядом институтов в различных зонах нашей страны, а также практикой проектирования систем комплексного мелиоративного регулирования, выполненного с учетом рекомендаций, сделанных на основании разработок коллег и учеников, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора.

Практическая ценность работы заключается в разработке количественных методов, позволяющих:

- на первых стадиях проектирования оценить вероятность необходимости тех или иных мелиоративных

воздействий, естественную продуктивность комплекса природных условий и эффективность мелиоративного регулирования как по каждому фактору, так и по всему комплексу;

– оптимизировать режим орошения, максимизируя выход продукции на один кубометр оросительной воды;

– обоснованно выбрать типичный район для создания опытно-производственного участка, опытной или водобалансовой станции, управляющей мелиоративной системой.

Указанные разработки использовались при технико-экономическом обосновании мелиоративных мероприятий и в проектах систем комплексного регулирования в зонах неустойчивого и избыточного увлажнения.

Реализация работы. Результаты работы использованы:

- при решении в X пятилетке проблемы 0.52.01;
- при составлении схемы комплексного использования и охраны водных и связанных с ними земельных ресурсов рек Оби и Иртыша;
- при составлении целевой программы строительства экспериментальных систем в Среднем регионе;
- при выполнении целевой программы по проблеме 0.Ц.0.34, задание 04;
- при экологической экспертизе ГКНТ технико-экономического обоснования проектирования и строительства водохранилища в котловине озера Неро для водоснабжения лугосеющих хозяйств Ростовского района Ярославской обл;

- при составлении проектов опытно-производственных участков комплексного мелиоративного регулирования "Лесное" (500 га.) Минской обл. БССР и "Сужа" (360 га.) Калининской обл. РСФСР;

- при обосновании необходимости и эффективности мелиорации в "Обосновывающих материалах увеличения водообеспеченности реки Карасук и озера Чаны Новосибирской обл.";

- при составлении следующих концепций: "Концепции развития комплексных мелиораций в РСФСР", "Концепции спасения Арала", "Концепции и программы развития комплексных мелиораций в СССР".

Апробация работы. Основные положения и материалы исследований докладывались и обсуждались на:

- научно-технических конференциях Московского гидромелиоративного института в 1967-1990 г.г.;

- IV и V Всесоюзных гидрологических съездах (Ленинград, 1973 г. 1986 г.);

- Всесоюзном совещании по проблеме комплексного регулирования факторов жизнедеятельности растений на мелиорируемых землях (Фрунзе, 1977 г.);

- первом симпозиуме по молекулярной и прикладной биофизике сельскохозяйственных растений (Краснодар, 1974 г.);

- совещании ВАСХНИЛ по применению физического и математического моделирования в мелиоративных исследованиях и проектировании (Москва, 1970 г.);

- научно-технической конференции по мелиорации земель Полесья (Пинск, 1970 г.);

- Конгрессе по ирригации и дренажу (Стамбул, 1973 г.);

- Международном симпозиуме по методам стабилизации сельскохозяйственных систем (Брно, 1980 г.);
- Всесоюзной школе-семинаре Северо-Кавказского научного центра высшей школы "Экология, математика, экономика" (Новороссийск, 1984 г., 1985 г., 1986 г., 1988 г.);
- Всесоюзной научной конференции по проблеме "Моделирование и прогнозирование водопотребления (Новосибирск, 1983г).

Кроме этого, цели комплексного мелиоративного регулирования как ресурсосберегающей и природоохранной технологии, а также концепции обоснования необходимости и эффективности мелиорации вошли в учебное пособие "Комплексное использование и охрана водных ресурсов" для специальности 1511 - "Гидромелиорация" и в учебник для географических специальностей В.С. Аношко "Мелиоративная география, Минск, "Высшая школа", 1987 г.

Материалы исследований докладывались также на ряде секций, советах и совещаниях, в том числе в ГГИ, Союзводпроекте, Минвохозе БССР, Венгерском сельскохозяйственном институте (г. Геделе).

Публикации. Результаты исследований автора, представленные в качестве докторской диссертации в форме научного доклада, опубликованы в 94 печатных изданиях общим объемом 65 печатных листов, в числе которых монографии "Биоклиматические обоснование мелиораций", 12,17 п.л. Гидрометеиздат, 1973г. и "Влагообеспеченность яровой пшеницы и ее расчет", 9,64 п.л., Гидрометеиздат, 1981 г.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОБЩАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ МЕЛИОРАЦИЙ

Движущей силой развития современных систем управления условиями природной среды являются противоречия между практически неограниченными потребностями развивающегося человечества и ограниченными возможностями использования материальных и энергетических ресурсов природной среды и общества.

В результате эволюции предки современных сельскохозяйственных культур формировались таким образом, что условия в местах их происхождения становились экологически оптимальными для данного вида. Человек, культивируя дикие растения путем искусственного отбора, повысил их продуктивность, но при этом частично терялась та устойчивость к изменению внешних условий, которая была свойственна данному виду. Кроме того, в процессе миграции из данного района в другой человечество, переносило растения в области с существенно отличными природными условиями, которые уже не являлись оптимальными для данного вида. Таким образом, создалась ситуация, при которой нарушалось соответствие структурно-функционального состояния растения среде обитания. Время, необходимое для адаптационной эволюции растения, много больше, чем время их обитания в новых условиях, поэтому еще на ранних стадиях развития человечество должно было прибегать к коренному улучшению условий среды, т.е. к мелиорациям.

Таким образом, движущей силой развития мелиорации послужило противоречие между требованиями, растений и условиями внешней среды. В дальнейшем при больших масштабах воздействий, противоречия возникли

между природными биологическими системами (биота почвы и водных объектов) и условиями среды изменяемыми человеком.

Используя селекцию, человек отобрал и воспроизвел чрезвычайно продуктивные растения, которые превышали продуктивность своих далеких предков в 50 - 100 раз. Но при высокой продуктивности возможности растения к саморегулированию (адаптации) существенно (в 3-5 раз) сокращаются. На величину урожая начинают оказывать существенное влияние факторы, малые по абсолютным величинам (микроэлементы, микродозы токсичных газов и др.), но являющиеся лимитирующим при оптимальном уровне остальных. Это приводит к тому, что *начиная с определенного уровня, существенные прибавки урожаев могут быть получены толь при регулировании всех факторов, влияющих на рост и развитие растений.* Таким образом, противоречие между желанием человека получить высокую продуктивность растения и невозможностью выполнить это без точного регулирования множества факторов внешней среды привело к возникновению комплексных мелиораций /55/.

Из определения мелиораций, которое дал А.Н. Костяков, следует, что основной задачей земледелия и мелиорации является управление круговоротом воды и зольных питательных элементов в целях прогрессивного повышения плодородия почв. Управление этими процессами осуществляется в направлении перевода воды и зольных элементов из геологического круговорота в биологический. Это позволяет обосновать связь их с круговоротом энергии, ибо перевести зольные элементы в биологический круговорот можно, накопив их в биомассе, а это, в свою очередь, можно сделать только под влиянием солнечной энергии. Такое управление А.Н. Костяков считал возможным осуществлять путем комплексных мелиораций, т.е. гидротехнического и агротехнического

воздействий, регулирующих водный, воздушный, тепловой, пищевой, а следовательно и биологический режим почвы.

Комплексные мелиорации можно рассматривать как науку о коренном улучшении (оптимизации) всех жизненно важных, для растения, факторов внешней среды /10/. В техническом отношении комплексная мелиорация - это система мероприятий, позволяющих существенно увеличивать продуктивность растений посредством воздействия на основные, для роста и развития, факторы внешней среды. При этом обязательным условием последствия комплексных мелиораций должно быть прогрессирующее увеличение плодородия почвы и предотвращение отрицательного влияния на окружающие биогеоценозы. Таким образом, системы комплексного мелиоративного регулирования являются диалектически обусловленным продуктом взаимодействия человека с окружающей средой, выработанным в процессе длительных попыток человека увеличить продуктивность естественных биогеоценозов.

Принципы и требования, закладываемые в основу разработки систем комплексного мелиоративного регулирования, в несколько дополненном варианте /42/ могут быть сформулированы следующим образом:

- основным критерием функционирования систем комплексного регулирования является максимум использования посевами фотосинтетически активной радиации (ФАР) солнца;
- все факторы регулируются активно и целенаправленно;
- в каждый момент вегетации в первую очередь регулируется (проводится внутри оптимального диапазона) значение лимитирующего фактора, находящего в относительном минимуме;

- оптимальные условия создаются в первую очередь в критические моменты роста и развития растений;
- ошибка регулирования должна быть значительно меньше ширины оптимального диапазона саморегулирования (адаптации) растения;
- оптимальные условия роста и развития должны обеспечиваться для растений каждого поля севооборота (система рассчитывается на наиболее требовательную культуру);
- при разработке и функционировании систем комплексного мелиоративного регулирования должна учитываться стохастическая неоднородность распределения свойств почв и запасов питательных веществ в целях учета неравномерности плодородия по полю;
- при создании системы должна обеспечиваться не только высокая продуктивность посевов, но и возрастающее плодородие мелиорируемых земель;
- экологическая безопасность систем комплексного мелиоративного регулирования обеспечивается восстановлением потоков энергии и вещества в сопряженных экосистемах доприродного уровня путем создания замкнутых мелиоративных систем.

Выполнение указанных функций систем комплексного регулирования требует конкретной организационной структуры, сопрягающей мелиоративные и сельскохозяйственные технологические процессы. В настоящее время наиболее подходящей, для таких целей организационной структурой, является программирование урожаев. Для мелиорируемых земель их можно рассматривать как организационную реализацию комплексного мелиоративного регулирования. Комплексные мелиорации являются теоретической базой программирования урожаев на мелиорируемых землях.

Как уже было сказано, задача мелиорации сводится к изменению условий внешней среды таким образом, чтобы сельскохозяйственные культуры давали возможно больший урожай, при этом выполнялись бы условия экономической эффективности и экологической безопасности.

Для решения поставленной задачи в процессе управления необходимо иметь количественное выражение требований растений (а в общем случае биоты) и условий внешней среды. В дальнейшем, зная, насколько условия среды не соответствуют требованиям растений (биоты), можно найти необходимые мелиоративные воздействия, после проведения которых разница между требованиями растений (биоты), и условиями среды будет в определенном смысле минимальной.

После вычисления необходимых мелиоративных воздействий может быть выполнен расчет исполнительных устройств по каждому регулируемому фактору. Далее осуществляется синтез устройств, регулирующих водный, тепловой и питательный режим в единую оптимальную систему /16/.

Этапы исследований методов комплексного мелиоративного регулирования можно представить в виде схемы, опубликованной в работах /10,16,26,48,50/ (рис. 1). На первом этапе должны исследоваться требования растений, а в дальнейшем любых живых организмов, к условиям внешней среды по ряду макрофакторов (водный и тепловой режимы, минеральное питание, газовое питание и солнечная энергия) и микрофакторов (микроэлементы и микроконцентрации газов). Под требованиями живых организмов в данном случае понимается количественное соотношение, показывающее изменение их продуктивности в зависимости от условий окружающей среды. Для целей регулирования необходимо, чтобы

требования растений и микроорганизмов были выражены количественной зависимостью, т.е. разработаны соответствующие математические модели (рис.1, группа 1).

Таким образом, основной задачей *первого этапа* можно считать выявление общих закономерностей взаимодействия растения и среды и создание теоретических моделей. Задачи, решаемые на этом этапе, были в той или иной степени рассмотрены автором. Так, система задач и оригинальные математические модели требований растений были представлены в работах /9;12;16;19;25;31;35;36;38;57), а микроорганизмов - в работе /45/.

Второй этап - изучение закономерностей формирования условий внешней среды и количественное выражение этих процессов (вторая группа математических моделей). Здесь необходимо решить вопрос о форме математического описания условий внешней среды. Форма такого описания должна наилучшим образом отражать сущность и природу описываемой величины. Описания можно разделить на детерминированные и вероятностные. Известно, что метеорологические процессы, которые определяют условия внешней среды, обусловлены солнечной активностью, являющейся случайной по времени. Эта случайность накладывает отпечаток и на метеорологические поля земной атмосферы, которые в конечном счете определяют осадки, температуру, ветер и другие внешние условия. Поэтому при описании внешних условий адекватным будет вероятностное описание. Однако закономерности формирования водного, теплового и пищевого режимов в каждой конкретной точке пространства можно выразить детерминированными дифференциальными уравнениями, что широко практикуется в настоящее время. При использовании в них законов распределения вероятностей коэффициентов проводимости можно получить

стохастическую закономерность формирования режима внешних условий и тем самым связать вероятностные и детерминированные методы описания внешних условий.

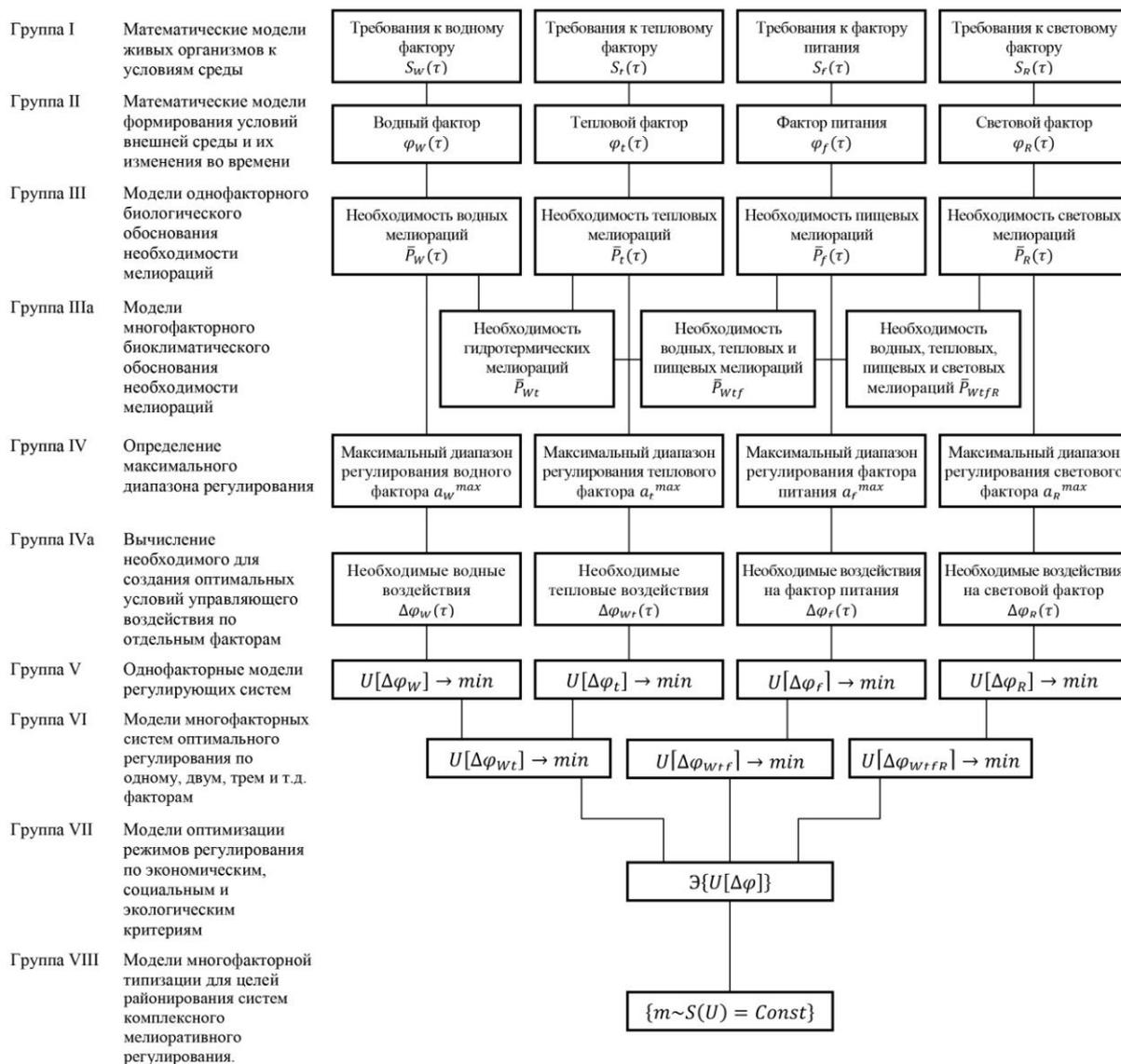
Вероятностные методы описания условий внешней среды и связь между отдельными факторами рассмотрены в работах /9;16;22;23;27;34;38;39;40;44/.

Исследования первых двух этапов можно обобщить в виде показателя природной необходимости мелиорации. В этом показателе отражается информация о требованиях живых организмов и условиях внешней среды, т.е. вероятность оптимальных или неоптимальных условий для растения в данном географическом районе. В определенном смысле этот показатель можно назвать биоклиматическим. При этом особенности почвообразовательных процессов, которые являются важнейшими при обосновании мелиораций, проявляются в водном, тепловом и пищевом режимах почв. В зависимости от исходных материалов, используемых для характеристики внешней среды (или от стадии проектирования), показатель необходимости мелиорации будет отражать общие географические закономерности, если он вычислен на основании климатических данных, или микроклиматические закономерности, характеризующие осушаемое болото, орошаемый участок или другую часть мелиорируемых земель, имеющих свои микроклиматические и почвенные особенности. Климатический показатель может использоваться для определения направленности мелиораций на большой территории, а также для планирования размещения мелиоративных объектов и энергетических затрат на создание оптимального режима. Микроклиматический показатель необходимости мелиораций используется для планирования мелиоративных воздействий на конкретном

массиве. Эти показатели возможно получить используя математические модели группы III и IIIa.

Таким образом, вычисление вероятности оптимальных или неоптимальных условий является содержанием третьего этапа исследований. Следует отметить, что обоснование потребности в мелиорациях может быть как однофакторным, так и многофакторным. В первом случае вычисляется вероятность неоптимальных водных либо тепловых условий, во втором - неоптимальность совместных водных, тепловых, пищевых и радиационных условий.

На четвертом этапе исследований определяется максимальный диапазон регулирования внешних условий, т.е. тот диапазон, в котором заключены все возможные (при заданной обеспеченности регулирования) отклонения внешних условий от оптимальных для растения. Максимальный диапазон регулирования определяет экстремальную способность регулирующей системы и может быть использован при ее проектировании.



Математические модели природного обоснования комплексных мелиораций (этапы III и IV) и реализация расчетов для конкретных зон отражены в работах /1;3;4;5;7;9;16;18;30/.

В оперативном регулировании важную роль играет управляющее воздействие, вычисление которого является содержанием пятого этапа. Это вычисление должно производиться с некоторым опережением времени, т.е. непрерывно должна рассчитываться разность между требованиями растений или других биологических объектов и прогнозируемой величиной внешних факторов. Поэтому основной задачей исследований на этом этапе является

разработка методов прогноза управляемых величин и расчет управляющих воздействий для каждого фактора с учетом их взаимовлияния.

Вопросы прогноза управляющих воздействий (*V этап*) в стохастическом варианте рассматривались в работах /17;27;28;38;51;52/.

Исследования на *шестом этапе* должны решить ряд вопросов, связанных с технической реализацией управления водным, тепловым и пищевым режимами, в том числе и вопросы автоматизации процессов комплексного мелиоративного регулирования.

Расчет регулирующих систем может быть осуществлен только в случае знания закономерностей движения пищи, воды и тепла от исполнительного элемента к растению. Поскольку среда, в которой происходит это движение, имеет сложную стохастическую геометрию, закономерности движения воды, тепла и пищи во многом еще не разработаны. Вместе с тем нельзя не отметить значительные успехи сделанные в этом направлении школой С.Ф. Аверьянова - Головановым А.И., Айдаровым И.П., Никольским Ю.Н., Рексом Л.М., Зейлигером А.М., Никитенковым Б.Ф. и другими. Несмотря на это одной из задач исследований на шестом этапе является изучение закономерностей движения воды, тепла и пищи от исполнительного устройства к растению и изменения свойств среды (почвы) под воздействием воды и удобрений.

На этой основе нужно решить, какой может быть инерционность различных типов регулирующих устройств и методов и, как следствие, каково должно быть размещение регуляторов на мелиорируемом поле с учетом его пространственной неоднородности.

Примеры технической реализации автоматизированных систем и принципы комплексного мелиоративного регулирования (VI этап) нашли отражение в работах /11;24;29;34;42;49;55/.

Регулирование одного фактора может быть осуществлено многими путями, однако не все они оптимальны. Поэтому на следующем, седьмом, этапе должна быть решена задача оптимизация регуляторов, как однофакторных, так и многофакторных.

На этом этапе в зависимости от поставленных перед регулированием задач в первую очередь должны быть определены критерии оптимизации. Далее предстоит выбрать наиболее удобное для решения данных задач, математические методы.

Однако следует учесть, что оптимальные однофакторные системы могут быть неоптимальными при работе с комплексом факторов, поэтому следует искать и многопараметрические критерии оптимальности. Очевидно, что многие из критериев оптимальности будут иметь экономическую структуру. Это обстоятельство делает необходимым изучение некоторых технико-экономических показателей и экономических связей.

Вопросы эффективности управления и оптимизации(VII этап) на основе моделей, разработанных автором или при его участии, рассматривались в работах /17;28;46;47;51;52;54;56;58;62;65 /.

Таким образом, расчет мелиоративной регулирующей системы можно считать окончанным с разработкой седьмого этапа.

Однако было бы расточительно не использовать информацию, полученную на одном объекте, для аналогичных разработок на других объектах. Перенесение результатов в этом случае невозможно до тех пор,

пока нет уверенности в идентичности основных свойств рассматриваемых объектов. Уверенность же можно приобрести только на основании количественной оценки сходства объектов. Такая оценка может быть выражена в виде количественной многопараметрической классификации мелиоративных объектов.

Эти вопросы исследуются на восьмом этапе. Здесь встречается ряд задач, решение которых для целей мелиорации только начинается. Это задача свертывания многопараметрической информации и представления ее в виде, удобном для расчетов, задача определения классовых эталонов, задача выбора критериев принадлежности к классу и ряд других. Кроме того, весьма важными на этом этапе будут программно-вычислительные задачи, так как некоторые алгоритмы классификации по многим параметрам целесообразно осуществлять на ЭВМ.

Основные идеи простых методов многофакторной природной типизации мелиоративных объектов (восьмой этап исследований) были изложены в работах [13; 14].

И, наконец, заключительный этап исследований состоит в разработке методов машинного проектирования, которое может быть осуществлено, например, путем поиска оптимального варианта регулирования для объектов данного класса.

Методические вопросы рассматривались практически во всех вышеупомянутых работах, но специально этим вопросам были посвящены следующие работы: создание приборов и измерительных систем [49; 66 и ряд других], выбор количества точек измерения при планировании экспериментов и оценка точности приборов [2; 6; 8], оценка ошибок

расчетов при обосновании необходимости и эффективности мелиораций [16].

Рассмотрим более подробно III этап исследований.

Как говорилось выше, этот этап является обобщающим требования растений, которые предполагается выращивать на мелиорируемых землях, и условия внешней среды в районе мелиорации. Если требования растений и условия среды совпадают по основным факторам (водному, тепловому, радиационному и фактору минерального питания), то мелиорация не нужна. Однако в связи с вероятностным характером условий среды меру совпадения требований растений и условий целесообразнее всего определить в виде вероятности наступления неоптимальных внешних условий как по каждому фактору, так и по совокупности всех факторов [16].

Вероятность в период вегетации вычисляется многократно, например, раз в декаду или пентаду. Если вероятность неоптимальных условий велика, необходимо предусматривать мелиоративные воздействия, вероятность которых будет равна вероятности неоптимальных условий. Таким образом, обоснование потребности в мелиорациях в указанном виде свертывает информацию о требованиях растений и условиях внешней среды в условиях внешней среды в один показатель.

Этот показатель должен отвечать следующим требованиям [16]:

1. Полностью отражать требования растений к основным факторам внешней среды;
2. Наиболее полно описывать условия внешней среды, с учетом стохастической природы факторов;

3. Учитывать те факторы внешней среды, которые могут регулироваться (влагозапасы и температура почвы, содержание элементов минерального питания в почве и др.);

4. Расчетный период, на который вычисляется показатель необходимости мелиорации, должен быть достаточно коротким, чтобы отразить изменение во времени требований растений и условий внешней среды; это позволяет выделить критические периоды, в которые определенному виду мелиораций следует уделить большое внимание;

5. Показатель необходимости мелиорации для одного, двух и т.д. факторов должен быть сконструирован таким образом, чтобы однофакторный являлся частным случаем двухфакторного, а последний - частным случаем трехфакторного и т.д.;

6. Показатель необходимости мелиорации должен давать представление, как часто тот или иной вид мелиорации должен проводиться на данном объекте или в данном районе.

Первой попыткой обосновать потребность в водных мелиорациях является работа П.И.Броунова (1913 г.) - схематические карты наступления засушливых декад в Европейской России. Развитием этой работы явилась районирование водобалансового коэффициента на ЕТС, выполненное А.Н.Костяковым в 1925 году. Эта работа была связана с планированием мелиораций. Показатель эффективности мелиораций должен конструироваться на основе показателя необходимости мелиорации и может быть представлен в виде среднеголетних прибавок урожая при управлении теми или иными факторами внешней среды. Это дает возможность, зная затраты на проведение различных видов мелиораций, оценить экономическую их эффективность.

Дальнейшее развитие идей А.Н. Костякова продолжалось в Проблемной лаборатории МГМИ, где для ряда территорий страны было выполнено обоснование необходимости и эффективности мелиораций. Теоретические положения этих работ были изложены в монографиях автора "Биоклиматическое обоснование мелиораций" и водообеспеченность яровой пшеницы и ее расчет". Рассмотрим более подробно всю систему математических моделей.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЕБОВАНИЙ РАСТЕНИЙ И ПОЧВЕННОЙ МИКРОФЛОРЫ К УСЛОВИЯМ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

В работах [34, 37] постулируются определенные принципы, на которых выполняется построение моделей и приведена система задач изучения требований растений к условиям внешней среды.

На ранних этапах автором были сделаны обобщения экспериментальных данных по многим (свыше тридцати) литературным источникам и получены обобщенные для разных факторов (влажность, температура, содержание питательных элементов) и растений (зерновые, картофель, сахарная свекла, хлопчатник, капуста, томаты, сосна) зависимости [15 и др.].

В дальнейшем были получены более общие закономерности, в которых параметры моделей являлись функциями этапов развития растения.

Так для i -го момента времени изменение относительной продуктивности S_i от условий внешней среды (фактор φ_j) можно записать в виде:

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

где k - коэффициент, φ_{opt} - оптимальное значение j -го фактора в i -ый момент времени, φ_{min} и φ_{max} - соответствующие функции от α_1 и α_2 , U - продуктивность

Решение этого уравнения для i -го момента времени жизни биологического объекта и для j -го фактора при $\varphi_{min} = 0$ можно записать в виде:

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

Эти зависимости позволяют получить границы экологической ниши при разных уровнях S . В случае двух факторов такая ниша может быть очерчена эллипсом, а в трехмерном - эллипсоидом.

Так например, при рассмотрении в качестве переменных водного (W) и теплового (t) факторов для фиксированного уровня $S = const$. уравнение запишется в виде:

$$\left(\frac{W - W_0}{\mathcal{G}_w} \right)^2 - \frac{2r(W - W_0)(t - t_0)}{\mathcal{G}_w \mathcal{G}_t} + \left(\frac{t - t_0}{\mathcal{G}_t} \right)^2 = const$$

где W и W_0 - текущие и средние влагозапасы почвы, \mathcal{G}_w - нормирующий множитель влагозапасов, t и t_0 - текущие средние температуры почвы, \mathcal{G}_t - нормирующий множитель температуры, r - величина, связанная с углом поворота осей симметрии эллипсов, отражающая степень зависимости одного фактора от другого.

Общий вид зависимостей $S(\varphi)$ показывает, что начиная с $S < 0.8$, происходит резкое падение продуктивности при малом отклонении

величины фактора от оптимального значения, т.е. начиная с уровня $S \leq 0.8$, происходит значительное возрастание абсолютного значения производной .

Осреднение значений S_i за время вегетации можно осуществлять по следующим зависимостям:

$$\bar{S}(\varphi) = \frac{U_j}{U_{\max}(R)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\varphi)$$

где U_j - продуктивность автотрофного звена в агроценозах сельскохозяйственных растений в j -ый год, $U_{\max}(R)$ - максимальная продуктивность, которая могла быть получена при оптимальных условиях и сумме фотосинтетически активной радиации R , $S_i(\varphi)$ - степень оптимальности фактора в i -ый момент времени, n - число учетных моментов.

Или
$$\bar{S}(\varphi) = \sum \eta_i S_i(\varphi)$$

где η_i - вклад фактора φ в i -ый момент в конечную продуктивность.

Или
$$\bar{S}(\varphi) = \wedge(\vee S_i)$$

где \wedge - оператор "И", обязательного прохождения всех фаз развития, \vee - оператор "ИЛИ" прохождения фазы в оптимальный момент.

Для перехода от однофакторных зависимостей $S_i(\varphi)$ к многофакторным $S_i^{(z)}(\varphi)$, где z - число факторов, можно синтезировать действие всех факторов исходя из "закона минимума". Это можно записать следующим образом:

$$S^{(z)}(\varphi) = \sum S_i(\varphi) g(l)$$

где

$$g(l) = \begin{cases} 1, & \text{при } \varphi = \min_l \\ 0, & \varphi_l \neq \min \end{cases}$$

С учетом (6) многофакторная зависимость за период вегетации автотрофа запишется в виде:

$$\bar{S}^z(\varphi) = \sum_{i=1}^n \eta_i S^{(z_i)}(\varphi)$$

Для определения потерь продуктивности $\Delta S^{(z)}$ за счет временных неоптимальных условий выражение (8) можно записать в виде

$$\Delta \bar{S}^{(z)} = 1 - \bar{S}^{(z)}(\varphi)$$

Представленные модели являются одним из возможных вариантов описания продуктивности автотрофов и в частности, сельскохозяйственных растений в зависимости от условий внешней среды.

Проверка адекватности предлагаемых моделей была выполнена автором [15, 30, 37 и др.].

Таким образом, в соответствии с принятой системой задач [34,37] было выполнено:

- обобщены экспериментальные материалы для получения зависимости прироста урожая (продуктивности) от условий внешней среды. При этом было установлено для различных растений и различных факторов, что в первом приближении эту зависимость можно записать в виде

$$S = A \exp\left(\frac{-k\varphi^2}{2U_{\max}}\right)$$

На основе анализа этих зависимостей удалось установить, что при $S \leq 0.8$ кончается зона адаптации растения.

- построена оригинальная динамическая модель требований растений к условиям внешней среды $S(\varphi; \tau)$ и определены изменения оптимальной величины фактора во времени $\varphi_{opt}(\varphi)$

- построена модель потерь продуктивности в зависимости от степени неоптимальности условий. Она включает и уравнения осреднения продуктивности за отдельные моменты вегетации.

- предложены методы идентификации модели на доступном экспериментальном материале.

- рассчитаны параметры моделей для ряда сельскохозяйственных культур (пшеница, травы, корнеплоды, картофель и др.)

На основе приведенных зависимостей можно записать выражения для прогноза урожая в виде:

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

где $U_{\max}(R)$ - прогноз максимального урожая как функция солнечной радиации, $\eta^{(\varphi_{\min})}$ - вклад в урожай i - го момента по минимальному фактору, $S_i^{(\varphi_{\min})}$ - степень оптимальности в i -ый момент по минимальному фактору. Конкретный вид зависимости для водного режима приведен в работе [56].

Аналогичный подход может быть использован и при описании почвенной биоты. Так например, некоторые закономерности продуцирования микроорганизмами подвижных форм азота в торфяно-

болотной почве в зависимости от температуры и влажности описаны в работе [44].

Следует отметить, что разработанные модели в определенной степени дополняют систему динамических моделей продукционного процесса, разработанных Россом, Томингом, Молдау, Лайско, Сиротенко, Хваленским, Галяминым и другими, но более приспособлены для целей обоснования комплексных мелиораций.

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Наиболее общей постановкой вопроса формирования условий внешней среды является рассмотрение этих процессов, как задач переноса энергии и вещества. Такая постановка объединяет все субстанции (влагу, газ, растворы, лучистую и тепловую энергию). Эти вопросы достаточно хорошо освещены в работах Лыкова А.В., Аверьянова С.Ф., Нерпина С.В., Чудновского А.Ф., Бондаренко Н.Ф., Голованова А.И., Айдарова И.П., Шульгина Д.Ф., Афанасика Г.И., Рекса Л.М. и многих других.

В перечисленных работах процессы формирования условий внешней среды рассматриваются как детерминированные, поэтому результаты такого моделирования могут использоваться для получения статистических рядов того или иного фактора в пространстве. Учитывая, что процессы формирующие условия внешней среды, суть стохастические, представлялось целесообразным развить вероятностный подход к этим задачам. Он является продолжением детерминированного подхода, и в определенной степени является его развитием.

В целях упорядочения системы моделей была разработана система задач [18, 37, 38, 40]. В ней, кроме традиционных задач, были и стохастические постановки. В представленных работах ряд этих задач был решен. В частности, найдена форма стохастического описания гидротермических условий сначала как случайных величин [3, 4, 5, 7, 9, 15, 17, 21, 42], а затем как случайной функции [26, 27, 37, 38]. Кроме этого, был решен ряд вспомогательных задач – обоснование выбора факторов для управления условиями внешней среды [15], выбор периода осреднения параметров, и обоснования необходимого количества измерений [2, 8]. Определена плотность линейной связи между параметрами гидротермического режима [15]. Определена точность расчетов влагозапасов и температур по предложенным алгоритмам [15].

В результате были разработаны следующие модели процессов формирования условий внешней среды. Гидротермические условия в i -ый момент времени с учетом их стохастичности могут быть описаны следующим выражением:

$$g_i(W, t) = \frac{1}{2\lambda\sigma_w\sigma_t\sqrt{1-r^2}} \exp\left\{ \frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(W_i - \bar{W}_i)^2}{\sigma_w^2} - \frac{2r_{iw}(W_i - \bar{W}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sigma_w\sigma_t} + \frac{(t_i - \bar{t}_i)^2}{\sigma_t^2} \right] \right\}$$

где $g_i(W, t)$ - двумерный закон распределения вероятностей факторов в i -ый момент времени, W_i , t_i и \bar{W}_i, \bar{t}_i - текущие значения и математические ожидания двух факторов внешней среды в i -ый момент времени, σ_w и σ_t - средние квадратические отклонения первого и второго фактора в i -ый момент времени, r_{iw}^2 - показатель плотности линейной связи между факторами в i -ый момент времени.

Аналогично могут быть описаны другие факторы, если будет доказано, что распределение вероятностей нормально.

Следует отметить, что в отличие от временного распределения, распределение факторов в пространстве подчиняется логнормальному закону. Поэтому для логарифмов величин факторов описание (11) сохраняется.

Исходные данные для построения законов распределения могут быть получены разными путями:

- использование многолетних измеренных величин данного фактора;
- использование модельных значений, полученных на основе интегральных или дифференциальных балансовых соотношений и др.

Упомянутые выше математические модели формирования того или иного фактора на данном этапе представляются достаточными для задач биоклиматического обоснования комплексных мелиораций.

В задачах определения эффективности мелиораций основной проблемой является определение зависимостей типа ресурс-продуктивность. Для этих целей в рамках стохастической постановки больше подходит математический аппарат случайных процессов. В целях определения возможности использования этого аппарата для описания процессов формирования условий внешней среды были проанализированы процессы формирования влагозапасов и на этой основе определена структура случайного процесса [16, 25, 26, 27].

Этот процесс можно классифицировать как марковскую односвязную цепь, обладающую свойством эргодичности [37, 50]. Для пищевого фактора аналогичная работа была выполнена под руководством автора аспирантом Маркиным В.Н.

Таким образом, процессы формирования условий среды можно описать матрицей переходных вероятностей $\|P_\varphi\|$. Для пяти градаций состояний фактора она имеет вид:

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

Эта матрица для консервативных факторов, таких как - влагозапасы, температура почвы, содержание элементов питания в почвенном слое имеет квазидиагональный характер. Анализ конкретных значений матрицы показывает, что этот марковский процесс является регулярным и, следовательно, эргодическим.

Интересно, что матрица $\|P_\varphi\|$ обладает свойством консервативности [37], т.е. система, попадая в то или иное состояние с большой вероятностью остается в нем.

Исключением из этого правила является состояние, в котором влажность превышает наименьшую влагоемкость и влага является более подвижной.

Таким образом, эти процессы, в первом приближении, можно описывать простой однородной марковской цепью с конечным числом состояний. Для расчета состояний условий внешней среды в каждый момент времени может быть использована следующая рекуррентная формула:

$$\|P^{(k)}\| = \|P^{(k-1)}\| \|P_\varphi\|$$

или

$$\|P^{(k)}\| = \|P_\varphi\|^k$$

где $\|P_\varphi\|$ - матрица переходных вероятностей.

Таким образом, матрицы вероятности состояний в k -ую декаду (пентаду или другой фиксированный отрезок времени) может быть получена путем возведения матрицы переходных состояний в k -ую степень. Это положение очень упрощает расчеты.

Имея матрицы вероятностей состояний для определенного отрезка времени, можно использовать их для оценки складывающихся естественных условий [37].

Возможные траектории изменения влажности во времени представляются в виде графиков стохастических прогнозов влажности. Прогноз на следующий момент можно существенно уточнить, имея значение фактора на конец предыдущего момента. Уточнение прогноза может быть получено также путем увеличения числа состояний (градаций) фактора.

Было показано [27,37], что в матрицах вероятностей состояний $\|P^1\|, \|P^2\|, \dots, \|P^0\|$ с увеличением времени (или степени) замечается тенденция выравнивания значений в столбцах. На основе этого наблюдения было показано [37], что существует некоторая предельная матрица состояний, в которой все строки одинаковы.

При условии эргодичности процесса эту матрицу можно получить путем составления и решения уравнений Колмогорова - изменение вероятностей состояний во времени.

Для матрицы (12) можно записать следующую систему уравнений Колмогорова:

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

где: P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 - вероятность пребывания фактора в состоянии 1 - 5 соответственно, $P_{12}; P_{21}$ - вероятность перехода из первого состояния во второе и обратно, $P_{23}; P_{32}$ - вероятность перехода из второго состояния в третье и обратно, $P_{34}; P_{43}$ - вероятность перехода из третьего состояния в четвертое и обратно, $P_{45}; P_{54}$ - вероятность перехода из четвертого состояния в пятое и обратно.

Предельное состояние определяется при условии равенства нулю левой части уравнений (15), т.е. $dP / d\tau = 0$. В этом случае система дифференциальных уравнений превращается в

систему алгебраических уравнений.

Решение этой системы дает значение компонент неподвижного вероятностного вектора в предельной матрице:

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

Вероятность состояний в этой матрице можно интерпретировать как относительное время пребывания в нем. Таким образом, в работах [16, 25, 26, 27, 37, 37, 50] ,было показано что стохастическими методами можно

прогнозировать условия внешней среды как краткосрочно, на основе расчета стохастических траекторий в каждую декаду, так и долгосрочно на основе матриц предельных состояний.

5. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ НЕОБХОДИМОСТИ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРАМИ ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ

Обосновать природную необходимость комплексных мелиораций это значит найти количественный показатель потребности в ней в данном районе для выбранного биологического объекта и вновь создаваемой экосистемы. Практически это означает, что нужно найти связь между требованиями биологического объекта и существующими в рассматриваемой зоне условиями внешней среды. Если внешние условия неблагоприятны для жизни биологического объекта, который планируется интродуцировать в данном районе, то следует запроектировать такую мелиоративную (улучшающую) систему регулирования этих условий, при которой они были бы доведены до оптимального уровня.

Количественная оценка природной необходимости проведения мелиорации может быть построена на моделях, приведенных выше [3, 4, 7, 9, 15]. Показатель, необходимости проведения мелиорации должен иметь вероятностную структуру и позволять в зависимости от экономических условий и технических средств проводить обоснование, исходя из учета одного, двух, трех и т.д. факторов внешней среды.

К этой задаче примыкает задача количественного определения вероятности оптимальных условий P_{opt} как вероятности того, что в

рассматриваемый период внешние условия будут находиться в оптимальном диапазоне требований биологического объекта.

Очевидно, что сумма вероятностей оптимальных P_{opt} и неоптимальных (или необходимости мелиораций \bar{P}_m) равна единице, т.к. это сумма вероятностей противоположных событий, т.е.

$$P_{opt} + \bar{P}_m = 1$$

Следовательно, вероятность необходимости комплексных мелиораций для биологического объекта равна:

$$\bar{P}_m = 1 - P_{opt}$$

Задача определения P_{opt} и \bar{P}_m была сведена к задаче определения вероятности попадания или непадения точки со случайными координатами в некоторую изооптимальную область.

Задача определения вероятности оптимальных условий может быть сформулирована следующим образом: определить вероятность появления заданной степени оптимальности условий $S(\varphi)$ по этому фактору в i -ой декаде. Для целей районирования сельскохозяйственных культур эта задача может быть сформулирована так: определить вероятность того, что условия внешней среды в данной географической точке попадают в изооптимальную зону R^N требований данного решения.

Кратко для N -факторов внешней среды это записывается так [15]:

$$P_{opt} = P[\varphi^N \subset R_s^N] = \int_{R^N} \dots \int g(\varphi_w) d\varphi_w d\varphi_t \dots d\varphi_N$$

где R_s^N - изооптимальная N-мерная область заданной степени оптимальности $S=0,9; 0,8; 0,7; \dots; 0,1$.

Для всех значений $S = \bar{0}; \bar{1}$ будет $P_{opt} = \bar{P}_{max}; \bar{0}$ т.е. в результате расчетов по формуле (17) при $R(0 \leq S \leq 1)$ получается функция $P_{opt}(S)$

Дополнением функции P_{opt} до единицы будет функция вероятности мелиораций по N-факторам, записанная аналогично выражениям (16) и (17)

$$P_{opt}(S) + \bar{P}(S) = 1$$

или

$$\bar{P}(S) = 1 - P_{opt}(S)$$

Функции $\bar{P}(S)$ и $P_{opt}(S)$ имеют общую точку при $P=0.5$ Абсцисса этой точки $z(0.5; S)$ для различных кривых $P(S)$ будут характеризовать условия произрастания культуры в данном районе. При $z(0.5; S) > \square \square \square \square$ вероятность оптимальных условий высокая, и данная культура может быть районирована в этом районе. При $z(0.5; S) < 0.5$ высока вероятность неоптимальных условий, и следовательно, без мелиоративных воздействий не обойтись.

Рассчитав для заданной величины $S-1$ вероятность оптимальных условий в каждой декаде P_i можно свернуть эту информацию в показатель Рвег, характеризующий весь вегетационный период [15].

Исследование моделей свертки P_i в единый показатель выявили [15], что наиболее адекватной является модель, созданная на двух основополагающих принципах принципа равнозначности фаз развития

растения и принцип взаимозаменяемости декад (пентад) внутри каждой фазы.

Тогда вероятность оптимальных условий за вегетационный период можно записать в виде:

$$P_{\varphi:i} = \wedge (\vee P_{\varphi:i:e})$$

где \wedge и \vee операторы "И", "ИЛИ" соответственно, $P_{\varphi:i:e}$ - вероятность наступления оптимальных условий по φ - му фактору в i -ую декаду и в j -ом географическом пункте. Расчетную формулу можно записать в виде:

$$P_{\varphi:e} = \prod_{k=1}^q \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \right]$$

где q - количество фаз развития, m – количество единичных временных отрезков в фазе.

Учитывая (20) вероятность необходимости мелиорации за вегетационный период можно рассчитать по зависимости

$$\bar{P}_{\varphi:e} = 1 - \prod_{k=1}^q \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \right]$$

Аналогичную процедуру расчета можно использовать и для многофакторного случая, если P_{opt} вычислить по (18) и эти значения подставить в (22), тогда можно получить многофакторный показатель P_l^n , который легко картировать, тем самым выявляя ареалы возможного распространения определенного сорта данной культуры.

Для одномерного (однофакторного) случая эти модели принимают еще более простой вид. Задача обоснования однофакторных мелиораций может быть записана в виде:

$$\bar{P}_{\varphi_1} = 1 - P_{opt}(\varphi'_{s=0.8} \langle \varphi \rangle \varphi''_{s=0.8})$$

где, $\varphi'_{s=0.8}$ и $\varphi''_{s=0.8}$ - нижняя и верхняя граница диапазона, при поддержании условий в котором продуктивность биологического объекта будет не ниже $S \geq 0.8$. В экологическом смысле это центральная часть зоны толерантности.

При условии, если закон распределения фактора нормальный, то вероятность необходимости однофакторных мелиораций (водных, тепловых, пищевых) вычисляется просто:

$$\bar{P}_{\varphi_1} = 1 - \left[\Phi^* \left(\frac{\varphi''_1 - \varphi'_1}{\sigma_{\varphi_1}} \right) - \Phi^* \left(\frac{\varphi'_1 - \bar{\varphi}_1}{\sigma_{\varphi_1}} \right) \right]$$

где

$$\Phi^* = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-U^2/2) du - \text{интегральная функция распределения,}$$

$\bar{\varphi}_1$ - центр рассеивания фактора, σ_{φ_1} - среднее квадратическое отклонение фактора.

Вероятность оптимальных условий по φ -му фактору может быть рассчитана по следующей формуле:

$$P_{\varphi_1} = \left[\Phi^* \left(\frac{\varphi''_1 - \bar{\varphi}_1}{\sigma_{\varphi_1}} \right) - \Phi^* \left(\frac{\varphi'_1 - \bar{\varphi}_1}{\sigma_{\varphi_1}} \right) \right]$$

Следует отметить, что вероятность необходимости мелиораций включает в себя вероятность необходимости понижения значения фактора и вероятность необходимости повышения значения фактора, т.е.

$$\bar{P}_\varphi = \bar{P}_{\downarrow\varphi} + \bar{P}_{\uparrow\varphi}$$

Значения входящих в эту формулу величин можно вычислить по следующим формулам:

$$\bar{P}_{\downarrow\varphi} = 1 - \Phi^* \left(\frac{\varphi'' - \bar{\varphi}}{\sigma_\varphi} \right)$$

и

$$\bar{P}_{\uparrow\varphi} = \Phi^* \left(\frac{\varphi' - \bar{\varphi}}{\sigma_\varphi} \right)$$

Реальные расчеты для многих районов страны и ряда культур по водному и тепловому факторам приведены в литературе [4, 5, 7,9, 15, 29]. В работах [15, 37] проведена оценка на достоверность предпосылок на основе районирования показателей необходимости гидротермических мелиораций.

В целях учета взаимодействия отдельных факторов друг на друга необходимость водных \bar{P}_w , тепловых \bar{P}_t и пищевых \bar{P}_f мелиораций может быть вычислена по следующим формулам:

$$\bar{P}_w = \bar{P}_w \bar{P}_t + \bar{P}_w P_t$$

$$\bar{P}_t = \bar{P}_w \bar{P}_t + P_w \bar{P}_t$$

$$\bar{P}_f = \bar{P}_w \bar{P}_t \bar{P}_f + P_w P_t \bar{P}_f + P_w \bar{P}_t \bar{P}_f + \bar{P}_w P_t P_f$$

где $P_w; P_t; P_f$ - вероятность оптимальных условий по водному, тепловому и пищевому факторам.

Как говорилось выше, показатель необходимости мелиораций в зависимости от исходной информации может отражать макро, мезо, и микро особенности природного объекта. Например при построении биоклиматического показателя необходимости мелиораций он может отражать особенности макро-, мезо- и микроклимата данной территории и связанные с этим особенности почвенного покрова, на который влияет характер почвообразующей породы, гидрогеологические условия, растительность и прочие факторы.

Далеко не всегда имеется информация всех видов обоснования и поэтому, проводя обоснование необходимости мелиорации для данного участка, целесообразно иметь возможность распространить его на другие участки, типичные рассмотренному. Эту процедуру можно выполнить, если количественно установить типичность отдельных участков относительно "эталонного".

Типизация может быть выполнена на основе некоторой математической модели количественной классификации, один из вариантов которой был разработан [13, 14]. Модели, разработанные автором широко используются и для других целей, в частности, для определения возможности распространения результатов исследований, выполненных на опытном участке, на производственные площади.

При построении классификации необходимо, чтобы она отвечала определенным требованиям [13]. Признаки, выбранные для классификации мелиоративных объектов должны иметь следующие свойства: 1) математическую структуру, адекватную структуре объекта, т.е. описываются

стохастическими закономерностями; 2) обладать устойчивостью характеристик при повторном измерении и однозначностью; 3) иметь разную степень значимости для принятия решения; 4) количество признаков должно быть минимально для данной классификации.

Выбранные признаки создают N-мерное пространство, в котором выделяется N-мерная область классового эталона. В [13] за эталон предлагается принять множество, обладающее перечисленными свойствами $\{\varphi'; \varphi'' \dots \varphi^n\}$, в пространстве признаков, заданное формальным правилом (характеристическим свойством), определяющим принадлежность природного (в том числе и мелиоративного) объекта m к множеству.

В связи с тем, что любой объект может быть задан различными характеристическими свойствами, каждая классификация индивидуальна.

Эталоном для данного класса объектов мелиораций предлагается [13] называть множество объектов, обладающее тем свойством, что при наложении (применении на них) одинаковых управлений создаются условия равной степени оптимальности по заданному множеству факторов, т.е.

$$M = \{m.S(U) = const\}$$

Одной из наиболее ответственных процедур является процедура формирования эталона. В целях достижения однозначности построения эталона, он должен формироваться с учетом следующих требований [13]:

1. Эталон в пространстве признаков не должен пересекаться. Это означает, что существует некоторое минимальное расстояние в заранее выбранной метрике между двумя классовыми эталонами, которые для всех

N-координат остается больше наперед заданной величины точности классификации.

2. Эталон должен иметь минимальный размер в пространстве признаков, позволяющий правильно производить классификацию, т.е. подмножества, составляющие эталон не должны быть пустыми.

3. Граница эталона определяется как геометрическое место точек, где мера принадлежности отличается от нуля на величину ошибки классификации.

В случае, если все признаки равноценны, то меру принадлежности к -го объекта к s -му эталону в пространстве признаков можно определить по зависимости

$$P[(\varphi_1 \subset S) \wedge (\varphi_2 \subset S) \wedge \dots \wedge (\varphi_n \subset S_n)] = \prod_{i=1}^n (\varphi_i \subset S)$$

где \wedge - обозначения конъюнкции и \subset знак принадлежности к множеству соответственно.

При введении признаков второго порядка математическую модель можно записать в виде:

$$P\left\{\wedge\left[\vee(\varphi \subset S)\right]\right\} = \prod_{i=1}^m \left\{ P_k \left[1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_n) \right] \right\}$$

где, \vee - операция логического сложения (дизъюнкция), m - количество признаков, k - номера признаков первого порядка, n - номера признаков второго порядка.

Для нормального закона распределения признаков выражение (35) можно записать в виде комбинаций интеграла вероятности [14]. Так вероятность принадлежности к условному эталону может быть записана в явном виде:

$$P = \prod_{i=1}^m \left\{ P_k \left[1 - \prod_{k+1}^m (1 - P_n) \right] \right\}$$

Значения P_k и P_n вычисляются по формуле

$$P_{k;n} = \Phi^* \left(\frac{S'' - \varpi}{\sigma_w} \right) - \Phi^* \left(\frac{S' - \varpi}{\sigma_w} \right)$$

где S'' - верхняя граница эталонного диапазона, S' - нижняя граница эталонного диапазона, ϖ - центр распределения признака, σ_w - среднее квадратическое отклонение. В первом приближении можно предполагать, и $S'_i = \varpi_i - 3\sigma_{w_i}$ и $S''_i = \varpi_i + 3\sigma_{w_i}$. При отклонении закона распределения от нормального может быть использован графоаналитический метод, разработанный в [14].

На основании представленных моделей была рассчитана типичность опытно-производственного участка "Лесное" по отношению к аналогичным землям центральной зоны БССР.

Расчеты показали, что ОПУ "Лесное" с вероятностью ($P=0,7 - 0,8$) является типичным для этой зоны. Это означает, что рекомендации, полученные на ОПУ "Лесное", могут быть распространены на площадь около 20 тыс. га.

Таким образом, представленная в этом разделе система математических моделей позволяет довольно просто по доступной

информации определять количественные показатели оптимальности условий для различных биологических объектов и вероятность необходимости комплексных мелиораций.

6. МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕЛИОРАЦИЙ.

Вопросы обоснования эффективности, которую можно разделить на экономическую и социальную, решены в мелиоративной науке основном только в экономическом плане да и то лишь для гидромелиораций. Социальные аспекты проведения мелиораций изучены недостаточно.

Вместе с тем оценки эффективности водохозяйственных, в том числе и гидромелиоративных мероприятий посвящены широко известные работы Зузика Д.Т., Воропаева Г.В., Пряжинской В.Г., Арента К.П., Кисарова О.П. и ряда других исследователей. В ряде работ рассмотрены оптимизационные аспекты, т.е. повышение экономической эффективности за счет управления, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. Основной трудностью в оптимизации сложных систем является получение функции эффективности (ресурс-результат) и реализация стохастичности. В ряде работ [16;26;27;42;45;50;51;54;55;57;61] удалось найти простые методы решения таких задач. Это было сделано на примере управления ресурсом воды при орошении, т.к. именно вода является носителем управляющих воздействий при проведении тепловых и пищевых мелиораций [36;41].

Построение функции эффективности, связывающей относительную продуктивность и водоподачу (оросительную норму) M включает ряд вспомогательных расчетов.

Во-первых это расчет изменения математического ожидания влагозапасов почвы во времени, которое записывается в виде [37]

$$\{\Delta W_{i+1}\} = \{W_{i+1}\} - \{W_i\} \quad (38)$$

где ΔW_{i+1} - вектор столбец изменения влагозапасов в конце $i+1$ - ой декады

$$W_{(i+1)}^j = \{W_{(i)}^j\} \|P\|^{(i)} \quad (39)$$

где $W_{(i+1)}^j$ - влагозапасы при начальном j -ом состоянии в i - ую декаду, $\|P\|^{(i)}$ i - тая степень матрицы вероятностей переходов.

Рекуррентная процедура дает возможность получить в конечном счете уравнения вида

$$dW/d\tau = A - K(\tau)W \quad (40)$$

где A - интенсивность подтока влаги в корнеобитаемый слой при $W = 0$. (в общем случае $A = A(W)$ W – текущее значение влагозапасов; τ - время; $K(\tau)$ - угловой коэффициент зависимости $dW/d\tau = f(W)$)

Расчеты проведенные по ряду географических пунктов [37] показали, что значение коэффициента K во время вегетации меняется мало, поэтому уравнение (40) имеет решение:

$$W = W_0 + (W_{HB} - W_0) \exp(-k\tau) \quad (41)$$

где W_0 - равновесная для данных почвенных климатических условий влажность почвы.

Далее для получения функции эффективности нужна связь между влагозапасами и оросительной нормой, которую можно записать в виде

$$M = M_{opt} + \frac{W - W_0}{W_{opt} - W_0} \quad (42)$$

где M_{opt} - биологически оптимальная оросительная норма;

W_{opt} - биологический оптимум почвенной влаги ($S = 1$).

На основе зависимостей (42) и (12) получена зависимость между относительной продуктивностью и оросительной нормой нетто:

$$S = \left[\frac{\left(W_{opt}^* - W_0 \right) \frac{M}{M_{opt}} + W_0}{W_{opt}^*} \right]^{\gamma^* W_{opt}^*} \left\{ \frac{1 - \left[\left(W_{opt}^* - W_0 \right) \frac{M}{M_{opt}} + W_0 \right]}{1 - W_{opt}^*} \right\}^{\gamma^* (1 + W_{opt}^*)} \quad (43)$$

В случае, если экспериментального материала недостаточно для идентификации зависимости (43), то можно воспользоваться процедурой получения зависимости $S(M)$, описанной в [61]. Нашими исследованиями было установлено, что зависимость $S(M)$ дает неоднозначные результаты, если не проведена оптимизация водораспределения внутри вегетационного периода. Для получения однозначной зависимости и в целях экономии ресурса проводится оптимизация водораспределения [16;27;50;51;55;57;61;64].

Задача оптимального распределения заданной (ограниченной) оросительной нормы (M) может быть введена к задаче максимизации

конечной продукции в условиях ограничения ресурса. Ресурс может ограничиваться не только дефицитом воды, но и экологическими соображениями, по которым оросительная норма не может быть больше некоторой экологически допустимой [46], из-за возможного снижения почвенного плодородия. Экологически допустимы оросительные нормы можно рассчитывать на основе методов предложенных Айдаровым И.П.

Задача распределения оросительной нормы для одной культуры может быть записана так:

$$\text{Найти } \max S_{\Sigma}(M), \text{ при } \sum m_i = M \text{ и } M' < M < M'' \quad (44)$$

где m_i - поливные нормы в i -ую декаду, M' и M'' минимально и максимально экологически допустимые оросительные нормы.

Задачу (44) при определенных условиях можно свести к задаче динамического программирования, рекуррентное соотношение которой запишется так:

$$S_{\Sigma_i}(M_0) = \max \{ S_{\Sigma}(M_0 - m_i) + S_i(m_i) \} \quad (45)$$

при условии $\sum_i^n m_i = M_0$ и $m_i \leq m_{\max}$.

Задавая различные M_0 , можно построить зависимость $S_{\Sigma} = S(M)$.

Подобные расчеты можно сделать по каждой культуре севооборота. В этом случае можно построить зависимость между водоподачей (нетто) каждого года и суммарным чистым доходом от реализации продукции - $D(M)$.

$$D_{Lj}(M) = U_{L\max} S_{\Sigma,L,j} C_L - 3_L \quad (46)$$

где L - индекс культуры, j - индекс года, $U_{L\max}$ - максимальная урожайность L -ой культуры возможная в j - ый год, $S_{\Sigma,L,j}$ - суммарная относительная продуктивность, C_L - закупочная стоимость, z_L - сельскохозяйственные и мелиоративные издержки, в которые входит и стоимость воды. Функция D_{Lj} является основой для планирования водопотребления на орошение.

Задачу распределения водных ресурсов между полями севооборота можно сформулировать, как задачу получения максимального чистого дохода при ограничении на минимальные валовые урожаи культур севооборота, определяемые плановой урожайностью. Эту задачу можно записать так:

$$\text{найти } \max \Sigma D_{Lj}(M) \text{ при } \sum_L^{M_L} M_L \alpha_{Lj} = M_{oj} \text{ и } U_{L\max} S_{\Sigma,L,j,\alpha_{L,j}\dots F} \geq \quad (47)$$

где $\alpha_{L,j}\dots F$ - площадь занятая L - ой культурой в севообороте в j - ом году;
 M_{oj} - оптимальная оросительная норма севооборота в j - ом году.

Задача (47), по-видимому, является общей при управлении как водными так и пищевыми и тепловыми (в случае подачи тепла на посев) ресурсами.

Изменяя M_{oj} , можно получить зависимость чистого дохода D_j^* по массиву орошения от водозабора M_{oj} j -го года.

Анализ этой зависимости показал, что в относительных координат D^*/D_{\max}^* и $M_0/M_{0\max}$ это монотонная функция с насыщением в районе значений $M_0/M_{0\max} = 0,6$. Фиксируя значения D_j^* на определенном уровне,

можно построить распределение необходимых для орошения водозаборов по расчетному многолетию.

Как известно обоснование экономической безопасности может быть выполнено путем определения изменений условий внешней среды при антропогенном воздействии. Это направление в мелиорации развивается Айдаровым И.П., Масловым Б.С., Шульгиным Д.Ф., Рексом Л.М., Минаевым И.П., Корольковым А.И., Пестовым Л.Ф. и другими. Однако, такой подход предполагает наличие норм реакции биоты на антропогенные воздействия. Другой подход - это моделирование взаимодействия основных частей биологического сообщества рассматриваемого объекта между собой и окружающей средой (работы Свирежева Ю.М.; Домбровского Ю.А.; Суркова Ф.А.; Воинова А.А.; Тарко А.М. и др.). Этот подход требует значительных экспериментальных исследований.

Для целей обоснования комплексных мелиораций, т.е. на предпроектной стадии может быть использован более простой интегральный метод оценки [42]. Если полагать, что экологическая система, которую предполагается подвергнуть антропогенным воздействиям, сформировалась под многолетним влиянием внешних условий, которые описываются законом распределения вероятностей $g(\varphi)$, то при антропогенном изменении должно происходить изменение параметров этого закона распределения $g(\varphi \pm \Delta\varphi)$ (по крайней мере математического ожидания). Тогда задачу количественной оценки антропогенного влияния можно сформулировать как нахождение вероятности принадлежности условий φ распределению $g_0(\varphi)$ и $g(\varphi \pm \Delta\varphi)$ и записать в виде

$$P = \int_{\varphi_0}^{+\infty} g_0(\varphi) d\varphi = \int_{-\infty}^{\varphi_0} g_0(\varphi \pm \Delta\varphi) d\varphi \quad (48)$$

При $P = 1$ экосистема несмотря на антропогенное воздействие остается прежней.

При $P = 0$ природная система разрушается полностью. По предварительным оценкам природная система сохраняет свои функции при $P > 0,9$. На основе этого критерия, решая обратную задачу, можно определить и экологически допустимое мелиоративное воздействие $\Delta\varphi$.

Выводы

1. Разработаны концептуальные положения теории комплексного мелиоративного регулирования.

2. Создана теория и разработаны количественные методы обоснования природной необходимости, экономической эффективности и экологической безопасности комплексных мелиораций.

3. Разработана общая схема исследований и определены системы задач комплексных мелиораций, часть из которых решена в представленных работах автора.

4. Разработана система моделей позволяющая:

4.1. Количественно определять границы экологических ниш различных биологических объектов при разном уровне функционирования.

4.2. Рассчитывать требования растений к условиям внешней среды при проектировании мелиоративных систем и обосновывать проектные урожаи при разных уровнях управления.

4.3. Описывать комплекс природных условий с учетом их стохастической природы.

4.4. Проводить обоснованное районирование сельскохозяйственных культур.

5. Разработана методология и комплексные методы обоснования природной необходимости комплексных мелиораций, которая реализована в виде биоклиматического обоснования необходимости гидротермических мелиораций для ряда сельскохозяйственных культур в различных зонах страны.

6. Разработаны комплексные подходы к оптимизации водораспределения с учетом стохастичности условий внешней среды и детального учета требований растений, позволяющие существенно экономить водные ресурсы при орошении, что дает возможность сохранять плодородие почвы.

7. Количественные методы реализованы при экспертизе проектов схем комплексного использования и охраны водных ресурсов и при проектировании направлений мелиорации в ряде районов страны.

**ПО ТЕМЕ ДОКЛАДА АВТОРОМ ОПУБЛИКОВАНО 94 РАБОТЫ,
ОСНОВНЫЕ ИЗ КОТОРЫХ СЛЕДУЮЩИЕ:**

1. Оценка обеспеченности агрометеорологических условий для произрастания картофеля на примере района г. Якутска. Труды МГМИ, т. 29, 1965, 0,4 п.л.

2. Выбор количества измерений при проведении некоторых мелиоративных экспериментов. Доклады ВАСХНИЛ, N 8, 1966, 0,4 п.л.

3. Расчет необходимости гидротехнических мелиораций. Вестник с.-х. науки, N4, 1968, 0,95 п.л.

4. Вероятность необходимости мелиораций. Сб. "Гидротехника, мелиорация и использование осушенных земель". Минск, 1968, 0,2 п.л.

5. Обоснование гидротехнических мелиораций. Сб. "Работы молодых ученых, гидротехника и мелиорация". М., Колос, 1968, 0,9 п.л.

6. Расчет инерционности тензиометров. Научные записки МГМИ, т. 31, 1968, 0,2 п.л.

7. Обоснование необходимости тепловых мелиораций. Вопросы осушения. Киев, Урожай, 1969, 0,3 п.л.

8. Минимальный объем измерений при изучении торфяных массивов. Вестник с.-х. науки, N 3, 1969, 0,# п.л.

9. Обоснование потребности в мелиорациях. Автореферат диссертации, 1969, 1,0 п.л.

10. Общая схема исследований методов мелиораций среды обитания растений. Проблемы мелиорации Полесья. Тезисы докладов научно-технической конференции по мелиорации земель Полесья. Часть 1. Минск, 1970, 0,32 п.л.

11. Экспериментальная система "Лесное" и изучение вопросов управления водным, тепловым и пищевым режимами торфяных почв.

Проблемы мелиорации Полесья. Тезисы докладов научно-технической конференции по мелиорации земель Полесья. Часть II, 1970, 0,3 п.л.

12. Некоторые математические модели системы растение-среда и их использование в мелиорации. Проблемы мелиорации Полесья. Тезисы докладов научно-технической конференции по мелиорации земель Полесья. Часть II, 1970, 0,32 п.л.

13. Некоторые задачи многофакторной количественной классификации мелиоративных объектов. Сб. "Режим осушения и методика полевых научных исследований", 1971, 0,34 п.л.

14. Типизация объектов с.-х. мелиораций. Вестник с.-х. науки N 1, 1971, 0,35 п.л.

15. Биоклиматическое обоснование мелиораций. Гидрометеиздат, 1973, 12,17 п.л.

16. Оптимизация стохастических процессов распределения воды при орошении (на англ. яз.). Труды XV конгресса ассоциации гидравлических исследований. Стамбул, Турция, 1973, 0,45 п.л.

17. Расчет вероятности оптимальных условий и вероятности мелиораций за вегетационный период. Применение математического и физического моделирования в мелиорации. Физическое и математическое моделирование в мелиорации. Колос, 1973, 0,2 п.л.

18. Некоторые математические модели системы растение-среда. Применение математического и физического моделирования в мелиорации. Физическое и математическое моделирование в мелиорации. Колос, 1973, 0,2 п.л.

19. Орошение и использование водных ресурсов (критико-библиографическая статья). Новые книги за рубежом. Серия Б N 8, 1973, 0,3 п.л.

20. Общая схема исследований методов мелиорации среды обитания растений. ГиМ N 12, 1973, 0,5 п.л.

21. Статистические характеристики физических и химических свойств осушаемых торфяных почв. Труды МГМИ, вып. "Сельскохозяйственные мелиорации", т. XXXVI, 1974, 0,3 п.л.

22. Баланс питательных веществ при увлажнении торфяных почв. Труды МГМИ, вып. "Сельскохозяйственные мелиорации", т. XXXVI, 1974, 0,4 п.л.

23. Некоторые задачи управления водным, пищевым и тепловым режимами на осушаемых торфяных почвах. Труды МГМИ, т. XXXVI, 1974, 0,4 п.л.

24. Регулирование водного режима почв на основе детального анализа требований растений. ГиМ N 7, 1975, 0,4 п.л.

25. Системный подход к разработке методов комплексного мелиоративного регулирования. Применение системного анализа в ирригации и дренаже. М., Наука, 1976, 0,4 п.л.

26. Применение цепей Маркова в расчете режима орошения. Применение системного анализа в ирригации и дренаже. М., Наука, 1976, 1,6 п.л.

27. Стохастические модели управления водным режимом растений. Применение системного анализа в ирригации и дренаже. М., Наука, 1976, 0,4 п.л.

28. Комплексные мелиорации будущего. Гидротехника и мелиорация, N 11, 1977, 0,3 п.л.

29. Обоснование размещения мелиоративных систем комплексного регулирования основных факторов жизни растений. Методические и методологические проблемы размещения производительных сил и региональной экономики. СОПС. М., 1977 (ДСП), 0,2 п.л.

30. Применение методов стохастической аппроксимации к исследованию зависимости урожайности от влажности. Труды МГМИ, вып. "Сельскохозяйственные мелиорации", т. 55, 1979, 0,3 п.л.

31. Количественное обоснование размещения мелиоративных систем комплексного регулирования. Труды МГМИ, вып. "Сельскохозяйственные мелиорации", т. 63, 1979, 0,23 п.л.

32. Определение необходимости орошения и дефицитов влагозапасов некоторых сельскохозяйственных культур по климатическим данным. Труды МГМИ, вып. "Сельскохозяйственные мелиорации", т. 63, 1979, 0,67 п.л.

33. Комплексное мелиоративное регулирование в зоне избыточного и неустойчивого увлажнения. "Комплексные мелиорации" под ред. акад. Шумакова Б.Б. М., Колос, 1980,

1,0 п.л.

34. Система задач и моделей требований сельскохозяйственных растений к условиям внешней среды при разработке методов

мелиоративного регулирования. "Комплексные мелиорации" под ред. Шумакова Б.Б. М., Колос, 1980, 0,5 п.л.

35. Требования растений к температурам и возможные методы их регулирования. "Комплексные мелиорации" под ред. Шумакова Б.Б. М., Колос, 1980, 1,1 п.л.

36. Автоматизированные системы комплексного мелиоративного регулирования как основа повышения интенсивности и стабилизации сельскохозяйственной системы. Сб. докладов Международного симпозиума. Часть II, 3...4.09, 1980, 0,7 п.л.

37. Влагообеспеченность яровой пшеницы. Л., Гидрометеиздат, 1981, 9,64 п.л.

38. Система задач по изучению условий внешней среды для комплексного мелиоративного регулирования. Труды МГМИ, вып. "Комплексное регулирование факторов жизни растений", т. 65, 1981, 0,91 п.л.

39. Выбор расчетного коэффициента фильтрации при проектировании осушительных систем. Труды МГМИ, вып. "Комплексное регулирование факторов жизни растений", т. 65, 1981, 0,23 п.л.

40. Генеральная программа научно-исследовательских работ по комплексному мелиоративному регулированию на период 1981...1985гг. с перспективой до 1990 года (ДСП). М., 1981, 4,8 п.л.

41. Автоматизация комплексного регулирования факторов жизни растений. "Гидротехника и мелиорация", N 1, 1982, 0,62 п.л.

42. Применение стохастических моделей для оценки изменения условий при перераспределении речного стока. Методы моделирования изменений природных условий при перераспределении водных ресурсов (тезисы докладов). Новосибирск, 1982, 0,06 п.л.

43. Влияние дополнительного увлажнения на баланс азота корнеобитаемой зоны многолетних трав на легких минеральных почвах. "Факторы, влияющие на плодородие почв и урожайность с.-х. культур на мелиорируемых землях". Научные труды ВНИИ с.-х. использования мелиорированных земель. Вып. III, Калинин, 1982, 0,3 п.л.

44. Некоторые закономерности продуцирования микроорганизмами подвижных форм азота в торфяно-болотной почве. "Комплексное мелиоративное регулирование почвенных процессов". Сб. научных трудов МГМИ. М., 1982, 0,44 п.л.

45. Расчет эффективности орошения. Сб. трудов научной конференции Пражского с.-х. института. Прага, 1982, 0,17 п.л.

45а. Количественное обоснование необходимости и эффективности мелиораций (биоклиматические аспекты). Всесоюзная научная конференция по проблеме "Моделирование и прогнозирование водопотребления". Тезисы докладов, Новосибирск, АН СССР, 1983, 0,13 п.л.

46. О нормах орошения в зоне главного канала переброски. "Гидротехника и мелиорация", N 7, 1983, 0,41 п.л.

47. Исследования по комплексным мелиорациям в ПЛ МГМИ (1972...1982 гг.). "Теория и практика комплексного мелиоративного регулирования". Сб. научных трудов МГМИ. М.,

1983, 0,2 п.л.

48. Автоматизация технологических процессов комплексных мелиораций. "Теория и практика комплексного мелиоративного регулирования". Сб. научных трудов МГМИ. М., 1983, 0,2 п.л.

49. Системный подход к разработке методов комплексного мелиоративного регулирования. Методы системного анализа в мелиорации и водном хозяйстве. Л.: Гидрометеиздат, 1983, 0,4 п.л.

50. Обоснование стохастических моделей управления водным режимом растений. Методы системного анализа в мелиорации и водном хозяйстве. Л.: Гидрометеиздат, 1983, 0,95 п.л.

51. Применение метода динамического программирования для оптимального распределения оросительной нормы внутри вегетационного периода. Оптимизация процессов комплексного мелиоративного регулирования. Сб. научных трудов МГМИ. М., 1985, 0,36 п.л.

52. Введение. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Учебное пособие. М.; Агропромиздат, 1985, 0,49 п.л.

53. Основные участники водохозяйственного комплекса. Их требования к водным ресурсам и режиму водоисточников. Орошение и осушение. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Учебное пособие. М.: Агропромиздат, 1985, 1,11 п.л.

54. Принципы построения имитационной системы комплексного мелиоративного регулирования. Комплексное мелиоративное регулирование. Сб. научных трудов МГМИ. М., 1985, 0,4 п.л.

55. Математические модели комплексных мелиораций при использовании имитационной системы в режиме оптимизации. Комплексное мелиоративное регулирование. Сб. научных трудов МГМИ. М., 1985, 0,7 п.л.

56. Расчет проектной урожайности в зависимости от водного режима мелиорируемых земель. "Гидротехника и мелиорация", N 9, 1986, 0,4 п.л.

57. Влияние уровня декадной водоподачи на функцию эффективности оросительной нормы. Комплексные мелиорации. Сб. научных трудов. М., 1986, 0,37 п.л.

58. Вопросы оптимизации водного и пищевого режимов при дополнительном увлажнении многолетних трав. Комплексные мелиорации. Сб. научных трудов. М., 1986, 0,41 п.л.

59. Требуется ... взаимоувязанного притока всех факторов. "Гидротехника и мелиорация", N 4, 1987, 0,5 п.л.

60. Связь средних значений и показателей пространственного варьирования у некоторых почвенных свойств. Труды МГМИ. Повышение эффективности мелиорируемых земель и использование водных ресурсов в мелиорации. М., 1987, 0,5 п.л.

60а. Особенности построения технологии оперативного управления орошением на осушаемых землях. Труды МГМИ. Комплексное мелиоративное регулирование. М., 1988, 0,2 п.л.

60б. Прогноз изменения концентрации биогенов в дренажном стоке. Труды МГМИ. Комплексное мелиоративное регулирование. М., 1988, 0,5 п.л.

61. Оптимизация планирования водопотребления на орошение. Труды V-го Гидрологического съезда. В. 4, 1989, 1,32 п.л.

62. Комплексные мелиорации (основные понятия). Труды МГМИ. "Теории и практика комплексного мелиоративного регулирования". М., 1990, 0,5 п.л.

63. Комплексная мелиорация как элемент управления качеством жизни человека. Труды МГМИ. "Теории и практика комплексного мелиоративного регулирования". М., 1990, 0,6 п.л.

64. Оптимальное управление поливами при эксплуатации оросительной систем (рекомендации). М.,ВО,"Агропромиздат", 1990, 2,35 п.л.

65. Изобретение "Тепломер для измерения тепловых потоков в почве". Бюллетень изобретений. N 11, 1962.

Соавторами некоторых из указанных выше работ являются: С.Ф.Аверьянов (10, 18, 20, 21), И.П.Айдаров (40), А. А. Богушевский (6, 28, 47), Н. П. Бунина (39), К. И. Бурлыко(11), М. Е. Вершинская (46), С.Г.Галактионов (12), Е.П.Галямин (28), А.И.Голованов (24), Ю.М.Землянов (44, 51, 55, 57, 60а, 61, 64), А.К.Кияткин (46), В.М.Лавриченко (21, 22, 43), Е.С.Марков (23), В.Н.Маркин (60б), Ю.Мосей (32, 43, 58), В.А.Мухина (21), Нгуен-Динь-Ай (51, 57, 61), Б.Ф.Никитенков (40), Ю.Н.Никольский (11, 19, 22, 24, 40, 56), Т.В.Пушкарева (44, 60), В.Г.Пряжинская (16, 27, 50), Е.Рудаченко (11, 14, 21), В.С.Сосновский (48), Г.П.Тиняков (30), С.А.Федоров (60), Д.В.Циприс (24), В.А.Шелгунова (1,35), Б.Б.Шумаков (28), В.Н.Щипакин (11, 21).