О. В. Рулева, Н. Н. Овечко

БИОПРОДУКТИВНОСТЬ ОРОШАЕМЫХ АГРОЛЕСОЛАНДШАФТОВ: МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

Волгоград∗ФНЦ агроэкологии РАН∗2017

УДК 634.93:581.522.4
Рулева О. В., Овечко Н. Н. Биопродуктивность орошаемых агролесоландшафтов: модели и прогнозы. – Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. – 115 с.

Проведен анализ и обобщение эмпирических данных, разработаны модели и методические приемы, определяющие биопродуктивность защищенных орошаемых агролесоландшафтов. Определены место и роль лесных полос в продуктивности и устойчивости сельскохозяйственного производства. Получена новая методика расчета с помощью дифференциальных исчислений и эмпирических данных динамики высоты, биомассы, суточных приростов, фотосинтетического потенциала, массы 1000 зерен сельскохозяйственных культур в орошаемых агролесоландшафтах, подтвержденная патентами и программными продуктами. Получена пространственная модель роста 12 сельскохозяйственных культур по четырем факторам.

Монография рассчитана на научных сотрудников и ученых в области агролесомелиорации, студентов и аспирантов биологических и сельскохозяйственных факультетов университетов, владеющих математическими методами.

O. V. Ruleva, N. N. Ovechko. Bioproductivity of irrigated agroforest landscapes: models and forecast. – Volgograd: FSC of Agroecology RAS, 2017. – 115 p.

The study considers the analysis and generalization of empirical data, models and methodical measures being developed which determine the bioproductivity of sheltered irrigated agroforest landscapes. The significance and role of forest belts for productivity and sustainability of agricultural production are determined. The new method of calculation of dynamics of height, biomass, daily increase, photosynthetic potential, mass of 1 000 grains of agricultural crops in irrigated agroforest landscapes, with the use of differential calculus and empirical data, which are confirmed by patents and software products, have been developed. The spatial model of growth of 12 agricultural crops according to 4 factors has been worked out.

The monograph is intended for researchers and scientists in the sphere of agroforest amelioration, students and post-graduate students of biological and agricultural university departments that master the mathematical methods.

Рецензенты: **И. М. Волохов**, доктор биологических наук,
В. Г. Юферев, доктор сельскохозяйственных наук

ISBN 978-5-9909841-2-7

© О. В. Рулева, Н. Н. Овечко, 2017.
© ФГБНУ "ФНЦ агроэкологии РАН", 2017.

ВВЕДЕНИЕ

В Волгоградской обл. общая площадь используемых для сельскохозяйственного производства земель составляет 5,8 млн га; по данным Росстата, валовый сбор зерна – 3,1 млн т, урожайность – 17,5 ц/га, в т. ч. пшеницы (озимой и яровой) – 2,0 млн т, урожайность – 19,6 ц/га. Однако для раскрытия всего потенциала пашни есть еще дополнительные резервы, которые улучшат условия роста и развития сельскохозяйственных культур в зоне неустойчивого земледелия (каким является Волгоградская обл.) за счет использования орошения в комплексе с лесной мелиорацией.

Лесная мелиорация влияет положительно на продуктивность культур. Урожайность их при этом выше в 2-3 раза, чем без орошения и лесной мелиорации.

Важнейшая роль в устранении неблагоприятных факторов среды отводится защитным лесным насаждениям (ЗЛН). Лесомелиоративные комплексы, повышая лесистость территории, существенно улучшают влагооборот и тепло- и газообмен, преобразуют простые аграрные ландшафты в более сложные, а следовательно, и более устойчивые. Так как агролесосистема искусственно создана человеком, то эффективно функционировать она может только при серьезном научном мониторинге в агролесоландшафте.

Динамика биопродуктивности сельскохозяйственных культур под влиянием лесных полос (ЛП), основанная на биологических особенностях функционирования агроценозов, позволила разработать новые методологические подходы и методические приемы для отбора образцов культур в поле в виде математически средних показателей, систематизации знаний в моделях продукционного процесса, позволяющих прогнозировать и управлять состоянием посевов на протяжении всего их развития.

1. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ МЕЛИОРАТИВНОЙ НАУКИ

1.1. Этапы становления агролесомелиорации

История становления и развития мелиоративной науки в России началась в конце XIX в. Первым государственным учреждением по мелиорации стал созданный в 1894 г. отдел земельных улучшений при Министерстве земледелия и государственных имуществ, который занимался орошением и повышением продуктивности земель. До Октябрьской революции 1917 г. в России орошались 3,8 млн га, осушались 3,2 млн га, было создано около 1000 га лесомелиоративных посадок, главным образом в Поволжье, на Украине, Северном Кавказе и в центральных районах России. Некоторые из этих насаждений сохранились до настоящего времени. Со сменой власти все работы по мелиорации в стране были приостановлены. Новый старт мелиорационных мероприятий в СССР пришелся на первую пятилетку (1929-1932 гг.). Именно тогда появляется новое направление в мелиоративных исследованиях – агролесомелиорация. Постановление СНК СССР № 627 "Об организации лесного хозяйства" вышло 31 июля 1931 г. Коллегия НКЗ СССР (протокол № 003/578) по предложению ВАСХНИЛ организовала 16 сентября 1931 г. Всесоюзный научно-исследовательский лесокультурный и агролесомелиоративный институт (ВНИАЛМИ).

Ведение поливного хозяйства показывает, что орошение в отсутствие лесных насаждений устраняет лишь почвенную засуху и не полностью защищает сельхозкультуры от гибели, вызываемой атмосферной засухой.

В Постановлении правительства от 26 октября 1938 г. "О мерах обеспечения устойчивого урожая в засушливых районах Юго-Востока" было уделено внимание выращиванию леса, в т. ч. полезащитных и других видов ЗЛН в степи. В период с 1928 по 1932 г. было посажено 212 тыс. га ЛП и с 1933 по 1937 г. – 278 тыс. га [1].

К 1941 г. площадь мелиорируемых земель превысила 11,8 млн га, а ЗЛН было создано свыше 900 тыс. га, но наибольший размах защитное лесоразведение получило в послевоенные годы.

В 1945-1965 гг. были восстановлены и частично реконструированы старые мелиоративные системы и построены новые: в зоне Волго-Донского, Кубань-Егорлыкского, Терско-Кумского каналов, Барабинской степи (Западная Сибирь) и др. На мелиорацию в 1966 г. было потрачено 1,7 млрд р., в 1985 г. – 8,3 млрд р. Это принесло свои плоды. С 1967 по

1985 г. площади орошаемых и осушенных земель в СССР достигли своих исторических максимумов – выросли соответственно с 9,8 до 19,7 млн га и с 7,5 до 14,6 млн га. Доля продукции земледелия, получаемой с мелиорированных угодий, составляла от 20 (1965 г.) до 34 % (1983 г.).

В 1989 г. в СССР было принято Постановление ЦК КПСС, Совмина СССР от 23.10.1984 № 1082 (с изм. и доп. от 13.01.1989) "О долговременной программе мелиорации, повышении эффективности использования мелиорированных земель в целях устойчивого наращивания продовольственного фонда страны", были разработаны мероприятия по широкому развитию мелиорации земель в СССР. Проделана большая работа по вводу в эксплуатацию орошаемых и осушенных земель, что являлось фактором увеличения производства сельскохозяйственной продукции и ослабления воздействия на земледелие неблагоприятных природно-климатических условий. ЛП, созданные на орошаемых полях и вдоль каналов, уменьшают скорость ветра на 30-50 %, испарение с почвы и испаряемость с водной поверхности на 20-30 %; повышают влажность воздуха на 2-6 %, снижают температуру воздуха летом на поле на 0,5-1,5 ºС и почвы на 0,5-2,5 ºС, испарение воды с водной струи при дождевании на 13 %; обеспечивают поступление воды за счет дополнительного снегоотложения в слой почвы 50-100 мм; понижают уровень грунтовых вод в степной зоне на 20-30 см и сухой степи на 50-100 см; увеличивают содержание гумуса в почве на 4-13 т/га и повышают урожай сельскохозяйственных культур на 20-40 % [2].

Вместе с тем существуют трудности в эксплуатации орошаемых массивов, которые приводят к засолению, переувлажнению, заболачиванию, что снижает возможности орошаемых и осушенных земель для получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.

Были созданы крупные районы орошаемого земледелия в РСФСР в Поволжье и на Северном Кавказе. Также осуществлялись работы по осушению переувлажненных земель в Нечерноземной зоне РСФСР и на Дальнем Востоке. Общая площадь орошаемых и осушенных угодий в РСФСР достигла 11,27 млн га, т. е. 9,9 % от общей площади пашни. После распада СССР работы по мелиорации были заморожены и показатели поползли вниз. Объемы защитного лесоразведения также стали уменьшаться и к концу 1991 г. на территории бывшего СССР имелось 5,6 млн га ЗЛН (без учета государственных защитных лесных полос) и других насаждений несельскохозяйственного назначения). В агросфере России на начало 1994 г. имелось 2,8 млн га насаждений, в т. ч. 1,2 млн га полезащитных, 1,0 млн га противоэрозионных, 97 тыс. га на аридных пастбищах, 360 тыс. га на песках и 52 тыс. га по берегам малых рек и вокруг поселков [3].

После длительного перерыва в эксплуатации орошаемых земель, связанного с рецессией в экономике страны, методы мелиорации и агро-

лесомелиорации снова становятся актуальными. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717 (с изм. и доп. от 31.03.2017 г.) "О Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельхозпродукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы" Минсельхозом России совместно с подведомственными профильными институтами разработан уточненный проект концепции Федеральной целевой программы "Развитие мелиорации", стратегической целью которого является повышение продуктивности и устойчивости сельскохозяйственного производства и плодородия почв средствами не только мелиорации, но и агролесомелиорации.

1.2. Агролесомелиоративное обустройство территории Нижнего Поволжья

Исследования по биопродуктивности орошаемых агроландшафтов проводились на европейской территории России, но наибольший интерес представляло Нижнее Поволжье. В его состав входят Волгоградская, Астраханская обл. и Республика Калмыкия. Так как Волгоградская обл. входит в число крупнейших регионов Российской Федерации по территории, населению и экономическому потенциалу и аграрное производство является одним из ключевых видов хозяйственной деятельности, представленных на ее территории, то вопросы повышения продуктивности земель за счет мелиорации имеют существенное влияние на экономическое и социальное состояние региона. Площадь сельскохозяйственных угодий составляет 8,8 млн га, в т. ч. 5,6 млн га пашни. По размерам сельхозугодий область занимает 3-е место в Российской Федерации, уступая по этому показателю только Алтайскому краю и Оренбургской обл. Все это дает основание утверждать, что Волгоградская обл. входит в число основных аграрных регионов России.

По своим климатическим условиям Астраханская обл. близка Волгоградской, обе являются крупными производителями зерна, крупяных, масличных культур (подсолнечник, горчица), овощей, фруктов, бахчевых и др. Республика Калмыкия стоит особняком, так как в регионе развито в основном животноводство. Орошение крайне засушливых территорий нецелесообразно. В связи с этим ЛП на орошаемых землях должны функционировать в первую очередь в Нижнем Поволжье, где они в комплексе с другими мероприятиями будут способствовать сохранению плодородия почвы, получению более высоких и устойчивых урожаев и изменять экологическую обстановку в целом.

Начавшиеся в 1961 г. работы по ирригационному строительству и развитию орошаемого земледелия в Нижнем Поволжье позволили Богдинской НИАГЛОС получить около 5 тыс. га пойменных и богарных

земель в Харабалинском р-не. Работы проводились на орошаемых системах в хозяйствах района (заложено более 100 га насаждений) и на орошаемом участке Богдинской НИАГЛОС, где была создана опытная система ЗЛН протяженностью более 12 км.

В Прикаспии (полупустынная зона) Астраханским областным управлением сельского хозяйства ЗЛН закладывались из 4-5 рядов с междурядьями 2,5 м и размещением в рядах 0,7 м. При посадке ЛП по границам землепользований и вдоль водоограditельных валов (дамб) с наружной стороны оросительных систем (ОС) закладывались 4-8-рядные насаждения. На затопляемых площадях сажали осокорь и ясень, вне затопления – вяз приземистый.

В сухой степи (Волгоградское Заволжье) Николаевского р-на лесопосадочные работы выполнялись на орошаемых землях Кисловской и Заволжской ОС, расположенных в северо-восточной части Волгоградской обл. В геоморфологическом отношении район исследований расположен на Приволжской песчаной гряде.

Район относится к зоне с повышенными скоростями ветра, чему способствуют открытые безлесные пространства. Преобладающими, наиболее вредоносными являются ветры восточных, юго-восточных и южных румбов. За год бывает до 20-30 дней с ветрами более 15 м/с, в отдельные дни, преимущественно зимой, до 35 м/с. В течение года отмечается до 8 дней с пыльными бурями.

На орошаемых землях создано около 350 га насаждений. В основном это посадки из тополей (осокорь, гибрид тополя пирамидального на осокорь и др.), большая часть которых представлена законченными системами. На землях бывшего ОПХ "Россия" (ООО "Лидер") имеется 70 га лесных насаждений, включая посадки вдоль дорог, магистральных каналов, по границам орошаемых участков. Возраст насаждений 20-40 лет, сохранилось несколько ЛП 1949-1954 гг. посадки. Первые посадки создавались по древесно-кустарниковому типу из вяза листоватого, клена ясенелистного, ясеня обыкновенного и зеленого, лоха узколистного и кустарников – акации желтой, аморфы, жимолости обыкновенной. Эти насаждения имеют, как правило, от 8 до 16 рядов и плотную конструкцию.

С 1978 г. лесонасаждения на оросительной сети начали создавать с уменьшенным числом рядов. Вдоль магистральных каналов и по границам участков не более чем из 4-х рядов, на полях севооборота, как правило, 1-2-рядные. На участках с поливом дождевальными машинами "Днепр", ДДА-100М и ДКШ-64 высаживались гибридные тополя (пирамидальный на осокорь и осокорь на бальзамический), береза, ясень зеленый и вяз приземистый. Имеются экспериментальные посадки из лиственницы сибирской, ореха черного и дуба черешчатого с пирамидальной формой кроны [2].

В Волгоградском Заволжье на Кисловской и Заволжской ОС с пода-

чей поливной воды на поля севооборотов по каналам и трубопроводам и с поливом дождевальными машинами с 1969-1979 гг., когда была создана система ЗЛН, при высоких инфильтрационных потерях поливной воды наблюдался значительный подъем уровня грунтовых вод с глубины 6,0-8,0 м до корнедоступного уровня (2,0-5,0 м) – в среднем на 0,3-0,4 м за сезон. Пополнение грунтовых вод происходило в основном из оросителей и каналов и лишь в отдельных случаях из зон ЛП при снеготаянии. С 1974 по 1988 г. грунтовые воды стабилизировались на глубине 1,2-2,0 м, в т. ч. с помощью биологического и инженерного дренажа. На орошаемом участке площадью 2,5 тыс. га было более 70 га ЛП и 11 скважин вертикального дренажа. Лесонасаждения в этот период имели максимальные приросты и водопотребление. Заболачивание и вторичное засоление наблюдались лишь на отдельных участках, как правило, у магистральных каналов и в микропонижениях. Период с 1992 по 2005 г. характеризуется резким сокращением поливных и оросительных норм, выводом части земель из орошаемого севооборота в богару, демонтажом инженерного дренажа, понижением уровня грунтовых вод, ухудшением состояния и даже гибелью защитных насаждений.

Уже в 2011 г. мелиоративный комплекс Волгоградской обл. становится одним из самых крупных в Южном федеральном округе. Мелиоративное имущество Волгоградской обл. в технологическом плане представляло единую систему, в которую входили федеральные головные насосные станции и гидротехнические сооружения с напорными трубопроводами, магистральными каналами, а также перекачивающие и подкачивающие насосные станции, сеть межхозяйственных и внутрихозяйственных трубопроводов областной государственной собственности и дождевальные машины частной собственности.

В 2011 г. площадь всех орошаемых земель в Волгоградской обл. составляла 233,4 тыс. га, в т. ч. регулярного орошения – 178,8, лиманного – 54,6 тыс. га.

На ОС эксплуатировалось 14,9 тыс. гидротехнических сооружений, 588 электрифицированных насосных станций. Протяженность оросительной сети составляла 6,2 тыс. км, из них открытой сети – 2,3, закрытой сети – 3,9 тыс. км [4].

Значительные объемы строительства и реконструкции мелиоративных систем, а также отдельно расположенных гидротехнических сооружений были выполнены в 2015 г. в Городищенском, Котельниковском, Светлоярском, Даниловском, Николаевском, Среднеахтубинском и Ленинском р-нах. Так, только в Городищенском муниципальном р-не за год орошение было организовано на площади 910 га. В целом в 2015 г. в сельскохозяйственный оборот в Волгоградской обл. было введено более 2900 га орошаемых земель. В Палласовском р-не было расчищено 4,5 км

оросительных каналов и порядка 10 км подводящих путей [5].

В Постановлении Правительства Российской Федерации № 717 решение о ведомственной принадлежности ЛП остается открытым [6]. В данной ситуации, когда сохранность ЛП составляет 40 % от состояния на 1991 г. (порядка 450 800 га), необходимо Министерству сельского хозяйства РФ, Департаменту мелиорации выделить средства на создание новых и поддержание старых ЛП, так как на фоне других мелиоративных мероприятий ЛП обладают долговечностью, стабильностью влияния на окружающую среду и высокой экологической чистотой. Для них характерна низкая себестоимость, но большая и долговременная отдача в виде повышенной продуктивности урожая, воспроизводства и сохранения плодородия почвы. Лесомелиоративный комплекс позволит повысить период эксплуатации оросительной сети, снизить оросительную норму на 10-20 % в зависимости от урожайности сельхозкультур и получить дополнительную продукцию с каждого гектара пашни.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА АГРОЦЕНОЗОВ

Основная задача земледелия – на основе использования энергии солнечной радиации, потенциала земли и условий окружающей среды, имеющегося растительного ресурса получать наибольшую продукцию в виде урожая или биомассы растений.

В смежных с сельским хозяйством и агролесомелиорацией дисциплинах, например в биологии, под продуктивностью растений понимают продуктивность фотосинтеза в единицу времени или конечный продукт – урожай растительной массы, ради которого выращивается данный сорт или сообщество растений [7].

Понятие продуктивности, которое в сельском хозяйстве и в агролесомелиорации, в частности, используется достаточно часто как конечный элиминирующий продукт, а в лесоводстве относится только к понятию леса, требует дальнейшей доработки [8, 9]. Продукция (лат. productio, от produco – произвожу, создаю) есть суммарное количество биомассы, образованное какой-либо совокупностью растущих и размножающихся особей за конкретный период времени, т. е. скорость ее образования. Продукцию группы животных и растений определяют как совокупность приростов массы всех особей, входивших в ее состав в течение данного интервала времени, в т. ч. погибших и элиминированных.

Итак, продуктивность – это скорость прироста массы, т. е. скорость создания органического вещества. Изучение энергетики сообществ показывает, что продуктивность представляет собой по существу меру потока энергии, приходящейся на единицу площади в единицу времени [10].

Понятие же урожай, определяемое ГОСТ 16265-80, а также другими источниками, как продукция, полученная в результате выращивания сельскохозяйственных культур, не соответствует требованиям к научной терминологии как однозначному словоупотреблению [11, 12]. Под урожаем мы понимаем количество продукта, накопленное на определенный момент (конец вегетации), или способность данного сорта давать максимальную полезную продукцию.

Агробиоценоз или агроценоз (от греч. agros – поле и биоценоз) – совокупность организмов, обитающих на землях сельскохозяйственного пользования, занятых посевами или посадками культурных растений. В естественных биоценозах сложный растительный покров, включающий множество видов растений, слагается исторически, а в агроценозах (на по-

лях и т. д.) растительный покров создается человеком и представлен обычно одним видом или даже сортом культивируемого растения и сопутствующими сорными видами [13]. К важнейшим факторам, определяющим уровень продуктивности посевов сельскохозяйственных растений, относятся: энергия солнечного света, обеспечивающая осуществление фотосинтеза, уровень минерального питания, водоснабжение и определенный температурный режим, который достигается главным образом путем подбора для каждой зоны наиболее подходящих типов и сортов растений [14]. Не менее важным свойством посевов является оптимальная оптическая плотность листьев агроценозов при наличии большой суммарной поверхности ассимилирующих органов, позволяющих с высоким КПД усваивать солнечную энергию. При этом большую роль играет густота посевов и сроки посадки растений. Однако это не решает полностью проблему повышения продуктивности. Так, недостаточное водоснабжение или минеральное питание, сдерживая ростовые процессы, приводит к получению посевов с малоразвитой площадью листьев, со сниженной интенсивностью фотосинтеза и ухудшенной активностью процессов роста и органогенеза, что в свою очередь является причиной низких урожаев.

В сельскохозяйственных районах страны уровень продуктивности растениеводства определяется не только вышеперечисленными жизненно важными экологическими критериями развития растений, но и сильными ветрами, вызывающими выдувание снега и мелкозема на полях, суховеями, которые увеличивают непродуктивные потери влаги на богарных землях. Вместе с тем циркуляционные процессы в атмосфере, особенно в нечерноземной зоне, вызывают разное изменение теплового баланса в виде заморозков на ранних этапах органогенеза сельскохозяйственных культур, что также сказывается на урожае и общей продуктивности популяций фитоценозов.

Важная характерная особенность живых организмов, отличающая их от предметов неживой природы, – это наличие специфического регуляторного аппарата, обеспечивающего возможность самовоспроизведения, наличие потенциальной возможности при благоприятных условиях безграничного увеличения объема живой системы с сохранением всех присущих ей основных качественных особенностей [15]. В основе безграничного расширения объема живой массы и самовоспроизведения лежит способность усвоения электромагнитной или химической энергии и различных веществ из окружающей среды с последующим построением своей системы.

Биогеоценоз, агроэкосистему, агролесосистему уместно рассматривать как автоматическую систему, у которой информационная целевая программа, выработанная в процессе эволюционного развития в условиях определенных закономерностей изменения внешних факторов, настроена на наиболее полное использование свободной энергии. Для фотоавто-

трофных организмов этой энергией является фотосинтетически эффективная электромагнитная энергия оптического излучения – фитоэнергия.

Фотосинтез растений является практически единственным энергетическим процессом в природе, при котором электромагнитная энергия солнца преобразуется в химическую, запасаемую в органических веществах. Так как органические вещества могут сохраняться неопределенно длительное время, то фотосинтез замедляет процесс непрерывного роста энтропии, происходящего повсеместно. В этой особенности одна из основных закономерностей живой природы. Живые организмы, и особенно растения, препятствуют возрастанию энтропии, непрерывно происходящей всегда и везде. Способность противостоять возрастанию энтропии возникла у живых организмов благодаря накоплению и использованию информации, а также транспирационному свойству. Постоянный рост количества информации и обменные процессы в результате транспирации растений увеличивают количество и разнообразие структур и функций живых организмов и их сообществ. Информация является мерой структурно-функциональной сложности, а транспирация – свойством живых систем к адаптации. Рост информации и обменных процессов препятствует росту энтропии [15].

Эволюционную приспособленность управляющей системы отдельных организмов и их сообществ в отношении более полного использования свободной энергии надо представлять в динамическом и статистическом плане. Эта система отвечает защитными реакциями самих организмов на постоянно изменяющиеся условия внешней среды и в то же время, используя далее накопленную информацию, прогнозирует последующие изменения внешней среды на более длительные сроки.

В управляющей системе растительных организмов – агроценозе – постоянно решается своеобразная задача: как более выгодно направить жизненные силы организма в целом и определенных его органов, чтобы в конкретных условиях внешней среды при антропогенной нагрузке сохранить вид, сорт и наиболее полно использовать доступную свободную энергию. Эта задача управляющей системой организма решается успешно лишь тогда, когда изменения факторов внешней среды не выходят за пределы толерантности вида сельскохозяйственной культуры. Роль сельхозтоваропроизводителя – сохранить пределы устойчивости растительного сообщества и повысить КПД растений с целью повышения урожайности.

2.1. Мелиоративные особенности агроценозов

Регион, в котором выполнялись исследования, в силу географического положения имеет недостаточное естественное увлажнение и специализируется преимущественно на выращивании зерна [16]. Дефицит

увлажнения пополняется за вегетационный период поливами. Орошение позволяет регулировать естественный режим влажности почвы в нужном пределе (70-80 % полевой влагоемкости). Кроме биологических особенностей орошаемых культур, отзывчивости сорта на орошение и других факторов оптимальные сроки и нормы полива сильно зависят от метеорологических условий и в связи с этим существенно меняются по годам, кроме того, при назначении поливов в конкретные годы в сельскохозяйственной практике учитывают критические периоды и фазы развития растений по физиологическим показателям, состоянию влажности почвы и др. [17, 18].

Водопотребление растений (почвенная вода и испарение с поверхности участка) учитываются в мелиорации суммарно. Суммарное водопотребление определяют по коэффициенту водопотребления и заданной урожайности методом водного баланса, по сумме среднесуточных температур воздуха за вегетационный период, температуре воздуха и относительной влажности, дефициту влажности воздуха, испаряемости, тепловому и радиационному балансу и т. д. [19, 20].

Коэффициент водопотребления – это количество воды в кубических метрах, расходуемое на 1 т основной продукции выращиваемой культуры [21]. В табл. 1 приведены коэффициенты суммарного водопотребления некоторых сельскохозяйственных культур.

Таблица 1

Коэффициент суммарного водопотребления по Д. В. Борисову и П. Г. Рябову [21]

Культура	Коэффициент, $м^3$/т урожая
Яровая пшеница	470-560
Ячмень	500-560
Овес	560-620
Кукуруза (зеленая масса с початками)	35-56
Многолетние травы (сено)	470-550
Картофель (клубни)	67-100
Томаты	150-200
Огурцы	120-210
Морковь (корнеплоды)	80-120
Свекла столовая (корнеплоды)	60-90

Суммарное количество воды, потребляемое различными растениями, расходуется в течение вегетационного периода неравномерно, причем вода вносится в почву в количестве, соответствующем потребности возделываемой культуры с учетом имеющихся в почве запасов влаги. Различают оросительную и поливную нормы. Оросительная норма – это количество воды, расходуемое на 1 га в течение всего вегетационного периода. Оросительную норму вносят в почву в несколько

приемов, которые называют поливами. Количество воды, $м^3$/га, необходимое для одного полива, называется поливной нормой [16, 21]. Оросительные и поливные нормы меняются в зависимости от зоны, климатических условий, механического состава почв. Срок полива определяется по фазам развития и физиологическим показателям растений. Причем нормы полива, сроки, время суток в литературе рассматриваются достаточно широко и противоречиво. Вопрос заключается лишь в строгом нормировании поливов, установленных размеров поливных норм, чтоб свести к минимуму потери на инфильтрацию и сток талых вод. График поливов учитывает технику полива, исходную влажность почвы, индивидуальные особенности культур, климат, увлажнение текущего года, поэтому его строят только для данного хозяйства и почти ежегодно перестраивают с учетом изменения определяющих его факторов [21-25].

Способы и техника полива оказывают также влияние на мелиоративное состояние орошаемых земель.

При выборе способа полива в хозяйствах учитывают свойства орошаемой почвы (влагоемкость, водопроницаемость, содержание солей), рельеф и уклон орошаемого участка, условия механизации и агротехнику возделываемых культур [26].

На опытных участках применялись дождевальные машины ДДА-100М, "Волжанка" (ДКШ-64), "Фрегат", МДЭФ "Кубань".

Исследования, проведенные на Кисловской ОС Заволжья, показали, что при поливе машиной ДДА-100 м глубина промачивания почвы составляет 5-10 см на малозаметных повышениях и до 2 м на микропонижениях. Объем планировочных работ при использовании "Фрегата" и "Волжанки" за один полив составляет 300 и 600 $м^3$/га соответственно [27].

Электрифицированная многоопорная самоходная дождевальная машина "Кубань" предназначена для полива кормовых, зерновых и технических культур, включая высокостебельные, на участках со спокойным рельефом (уклон поля не должен превышать вдоль машины 0,007).

Электрифицированная низконапорная дождевальная машина МДЭК "Кубань-ЛК-1" предназначена для полива сельскохозяйственных культур в движении по кругу. Конструктивная схема машины и технология ее работы такие же, как у машины "Фрегат", элементы конструкции имеют высокую степень унификации с машиной МДЭФ "Кубань-Л" [28].

Орошаемые участки с ЛП должны быть увязаны с оптимальными расстояниями между продольными и поперечными ЛП, типом почв и оросительной техникой.

Так, для Поволжья расстояние между продольными ЛП не должно превышать 500-800 м, а между поперечными – 1000-2000 м с учетом типа дождевальной установки и экономической целесообразности. При поливе с помощью "Волжанки" с длиной крыла 400 м одна из ЛП должна

быть заложена вдоль распределительного трубопровода, т. е. посредине поливной карты. При использовании "Фрегата" за счет его кругового движения и вращения дождевальных аппаратов (для смягчения отрицательного влияния ветра на эффективность полива) допускается предельное расстояние между продольными ЛП до 900 м [27].

2.2. Общие вопросы математического моделирования агролесосистем

Экосистемный подход известен в экологии давно и используется при изучении совокупностей организмов и неживых компонентов среды, находящихся в тесной взаимосвязи. Эти совокупности (экосистемы) имеют условные границы, определяемые круговоротом основных биогенных элементов, рассматриваемым в определенном пространственно-временном масштабе. В пределах экосистемного подхода можно различать структурные направления, занимающиеся изучением строения экосистем и их функционирования. Но структура экосистемы не может рассматриваться как простая иерархическая система из нескольких уровней организации, так как при этом за ее пределами оказываются неживые компоненты. Объединить в понятие экосистемы ее живые и неживые составляющие можно только подчеркнув ту особую роль, которая принадлежит процессам их взаимодействия, т. е., по словам Линдемана, "…системе физико-химико-биологических процессов, протекающих в пределах некоторой пространственно-временной единицы любого ранга" [29]. В агролесомелиорации единицей такого ранга является экосистема межполосного пространства с возделываемой сельскохозяйственной культурой. Для агролесосистем вообще свойственны адаптивность, долговечность, экологичность, нарастание мелиоративного эффекта во времени, что эволюционно характерно для биосистем. Поэтому в системе ЛП межполосная клетка рассматривается нами как экосистема растительного сообщества с четко выраженными границами, хотя проведение границ между экосистемами до некоторой степени условно, так как между ними обязательно существует обмен веществом и энергией. Кроме того, в нашем случае присутствует фактор (помимо климатических), постоянно воздействующий на фитоценоз на протяжении всего периода вегетации, – ЛП, которые способствуют формированию сообщества, отличного от растений открытого пространства. При изучении межполосной экосистемы нами было подмечено, что к растительному сообществу и агроценозам, как частному случаю фитоценозов при всей их сложности, динамичности развития самого сообщества и его составляющих, могут быть приложимы подходы и методы оптики мутных сред [30-32]. В механике сплошной среды (мутной, жидкой и т. д.), рассматривающей движение больших совокупностей ато-

мов и молекул, в большинстве подходов не принимается во внимание атомное и молекулярное строение вещества – оно считается непрерывной средой. В статистическом смысле оно означает переход к средним величинам, т. е. замене истинных флуктуирующих величин статистически средними [33]. Процессы, происходящие внутри ценозов и с их участием, затрагивают вопросы геофизики, химии и биологии, так как существует "…единство ритмической структуры Солнечной системы, Земли и биологических систем как во временном, так и в пространственном аспектах" [34]. Для удобства моделирования взаимодействия растительного сообщества (агроценоз), развивающегося под влиянием ЛП, и объяснения физической сущности этого явления необходимо применить законы термодинамики, так как экосистема межполосного пространства относится к макроскопическим физическим системам.

Характерным свойством всех агрогеосистем является то, что их материальные точки находятся под воздействием одновременно большого числа независимых ортогональных физических полей, т. е. их реальная динамика реализуется в многомерном поле сил. Развивая представления В. И. Вернадского [35], можно выделить следующие основные физические поля: гравитационное, радиационные, химические, термодинамические, фазовые, электромагнитные, биологические, химико-электромагнитные, информационные. Многомерность поля сил J_i, действующих на материальные объекты, в общем виде описывается выражением

$$J_i = \Sigma_k L_{ik} X_k, \qquad (1)$$

которое представляет формализованное, наиболее общее описание любого физического процесса:

$$J_2 = L_{2,1} X_1 + L_{2,2} X_2 + \ldots + L_{2,k} X_k. \qquad (2)$$

Каждое из уравнений этой системы описывает перемещение одного конкретного заряда в поле k потенциалов под действием k сил. В прямых процессах сила X_k вызывает поток J_k, например градиент температуры вызывает поток тепла (теплопроводность), градиент концентрации – поток вещества (диффузию). Такие необратимые процессы характеризуются кинетическими коэффициентами L_{kk}, пропорциональными коэффициентам теплопроводности, диффузии, вязкости.

Анализируя выражение (2), получаем, что природные явления, объекты и процессы могут в общем случае классифицироваться (выделяться) либо по градиентам потенциалов – по движущим силам X, либо по величинам феноменологических коэффициентов L, либо по тем и другим одновременно. Так, если выделять и классифицировать агролесосистемы по определяющим полям и их градиентам, по так называемому функциональному подходу, который использовался нами при изучении продуктивности сельскохозяйственных культур с доминирующим влиянием ЛП как экологического фактора, и поведение растений в поле геопотенциала и

во всех остальных физических полях (радиационные, химические, термодинамические и т. д.), то мы получим иерархию экосистем или биоценотических систем и их распределение в пространстве.

Необходимо подчеркнуть, что принципиальным моментом использования теории поля для теоретического формализованного описания любых агроэкосистем является, прежде всего, выделение иерархии материальных точек данной системы, а затем выделение физических полей движущих сил, действующих на эти материальные точки. Наиболее физически обоснованно и конструктивно, на наш взгляд, ввести поле потенциала экологического взаимодействия Φ как поле непрерывной функции ряда системных параметров S_J:

$$\Phi = \Phi(S_1 S_2 \ldots S_j), \qquad (3)$$

где $S_1 \ldots S_j$ – широкий спектр параметров, отражающих доступность ресурсов, таких как влага, свет, элементы минерального питания и т. д. Элементами, на которые действует потенциал Φ, являются отдельные растения или группы растений, конкурирующие за ресурсы и имеющие характерные размеры местообитания, идентифицируемые в пространственных координатах x, y. Потенциал экологического взаимодействия относится к каждому индивидууму и определяется в терминах процессов, влияющих на рост растений. Фактически это количество ресурсов, оставшихся после использования для роста всех остальных соседних растений, которое может быть использовано в данной точке вновь появившимся сеянцем после истощения эндосперма его семени. Если обозначить через $G_0(r)$ нормированную от 1 до 0 функцию относительной скорости роста отдельно растущего сеянца в точке $r(x, y)$, то потенциал экологического взаимодействия $\Phi(r)$ в точке $r(x, y)$ определяется как $\Phi(r) = 1 - G_0(r)$. В рассматриваемом агроценозе формализация влияния соседних растений на перераспределение света, влаги и элементов минерального питания на поверхности почвы проводилась с помощью простых функций типа двумерного распределения Ферми-Дирака (для описания влияния корневых систем на количество доступной влаги и элементов минерального питания), двумерного распределения Гаусса (для описания поля радиации под пологом растений) и т. п.

Возвращаясь к теории, лежащей в основе расчетов, поясним, что в отличие от объектов, рассматриваемых в классической термодинамике, биологические объекты являются предметом изучения термодинамики неравновесных или необратимых процессов. Термодинамика неравновесных процессов рассматривает системы, в которых протекают неравновесные процессы, как непрерывные среды, а их параметры состояния – как полевые переменные, т. е. непрерывные функции координат и времени. Для этого систему представляют состоящей из элементов объемов (элементов среды). Количественное описание неравновесных процессов при

таком методе заключается в составлении уравнений баланса и феноменологических уравнений рассматриваемых процессов для элементов объемов на основе закона сохранения массы, импульса и энергии через градиенты термодинамических параметров, а также уравнения баланса энтропии [36].

Фитоценозы сравнивают с жидкой средой, так как вывод уравнения неразрывности выражает закон сохранения количества вещества в заданном объеме через плотность ρ и скорость υ среды. Пусть на оси x располагается много дискретных частиц N_i, имеющих массу m_i, причем несколько частиц могут находиться в одной точке пространства, как бы проходя одна сквозь другую, или находятся на плоскости, где ось x представляет линию этой плоскости:

$$\rho = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta x} = \frac{dm}{dx}, \quad (4)$$

где ρ – линейная плотность среды, т. е. масса порции частиц, приходящейся на малый участок оси Δx, отнесенная к единице длины этого участка. В разные моменты времени t плотность ρ в точке x различна, т. е. $\rho(x, t)$, и отвечает некоторому непрерывному распределению массы вдоль оси x.

Массу вещества можно получить с помощью интегрирования плотности, т. е. каждому интервалу $a \leq x \geq b$ в любой момент времени t отвечает масса

$$m_{a,b} = \int_a^b \rho(x,t)dx. \quad (5)$$

Можно рассматривать и "плотность" $n = dN/dx$ числа частиц, равную числу частиц на малом участке оси x, отнесенному к единице длины этого участка. Этот подход синтезирует дискретный (рассматривает количество отдельных частиц N) и непрерывный (так как N дифференцируется по x) подходы к системе. Здесь $dx < L$ длины всей системы, но $dx > L/N$ характерного расстояния между соседними частицами, т. е. N должно быть очень большим. Если все частицы имеют одинаковую массу m_0, то $dm = dNm_0$, откуда $n = \frac{\partial N}{\partial x} = \frac{1}{m_0}\frac{dm}{dx} = \frac{\rho}{m_0}$, т. е. плотность числа частиц пропорциональна обычной массовой плотности.

Уравнение неразрывности выражает закон сохранения количества вещества в заданном объеме. Вернемся к одномерному упорядоченному движению вещества через перпендикулярное препятствие в виде ЛП. Известно, что необратимый перенос массы компонента смеси в пределах одной или нескольких фаз осуществляется в результате хаотического движения молекул, макроскопического движения всей среды (конвективный перенос), а в турбулентных потоках – и в результате хаотического движения вихрей различного размера. В большинстве случаев в массообмене участвуют две или более фаз, в которых концентрации целевого компонента при равновесии различаются. При взаимодействии

двух фаз в соответствии со вторым началом термодинамики их состояние изменяется в направлении достижения равновесия, которое характеризуется равенством температур и давлений фаз, а также равенством химических потенциалов каждого компонента в сосуществующих фазах. Движущая сила переноса какого-либо компонента из одной фазы в другую – есть разность химических потенциалов этого компонента во взаимодействующих фазах. Переход компонента происходит в направлении убывания его химического потенциала [37]. Выделим мысленно интервал оси x с концами x и $(x + dx)$, на котором в некоторый момент t находится порция среды массы $dm = \rho dx$. За время dt через левый конец участка внутрь интервала войдет масса $q_m dt$, выйдет $(q_m + d_x q_m)dt$. Разница между этими величинами идет на изменение массы в интервале, т. е. $d_t(dm) = q_m dt - (q_m + dx q_m)dt = -d_x q_m dt$, деля на $dt\,dx$ и перенося оба члена в одну сторону, имеем $\frac{dqm}{dx} + \frac{d}{dt}\left(\frac{dm}{dx}\right) = 0$.

Зная, что $q_m = \rho v$, $dm = \rho dx$, приходим окончательно к уравнению неразрывности $\frac{d\rho}{dt} + \frac{dq}{dx} = 0$ или $\frac{d(\rho v)}{dx} + \frac{d\rho}{dt} = 0$.

Раскрывая скобки, получим еще одну форму уравнения неразрывности: $v\frac{d\rho}{dx} + \rho\frac{dv}{dx} + \frac{d\rho}{dt} = 0$. Учитывая выражение для полной производной по времени, получаем $\frac{d\rho}{dt} + \rho\frac{dv}{dx} = 0$. При стационарном потоке ρ и v не меняются со временем, т. е. зависят только от x, тогда $\frac{d(\rho v)}{dx} = 0$, т. е. $\rho(x)v(x) = \text{const}$.

Таким образом, поток вещества во всех точках одинаков. При однородном потоке, для которого ρ и v не зависят от x, а могут зависеть только от t из уравнения (2), получаем, что $\rho = \rho_0 = \text{const}$, тогда как v может произвольно зависеть от t [33].

Итак, в основе уравнения диффузии лежит уравнение (2) неразрывности среды. Более того, обзор многочисленных литературных источников показал, что при исследовании растительного покрова более подробно в нем изучается газообмен и фотосинтез. Известно, что энергия солнца, расходуемая на создание органического вещества, т. е. самого растения, в основном лежит в видимой части спектра, поэтому при изучении газообмена, составляющего основу уравнения диффузии, являющегося фундаментальным, необходимо рассматривать именно физиологически активную часть лучистой энергии. Для определения профиля концентрации углекислого газа в растительном покрове, учитывая что именно CO_2 определяет основу питания растения при его формировании, было предложено дифференциальное уравнение $\frac{dq}{dz} = \frac{d}{dz}\left(\frac{dc}{dz}k_c\right) = \left(\frac{\varepsilon \cdot I}{1+\mu \cdot I} - r\right)$F, где q – поток углекислого газа, k_c – коэффициент турбулентности, dc/dz – вертикальный

градиент концентрации углекислого газа в растительном покрове; I – интенсивность физиологической радиации; r – дыхание; F – индекс плотности биомассы; $F - \int_0^H F(z)\,dz$, ε и μ – некоторые константы, характеризующие фотосинтетическую активность растений и подлежащие определению [38]. Величина $\left(\frac{\varepsilon I}{1+\mu I} - r\right)F$ представляет собой "остаточную" ассимиляцию (фотосинтез минус дыхание). Для решения этого уравнения были использованы простейшие экспоненциальные закономерности, которые позволили упростить выражение или определить некоторые коэффициенты *k, I* прямым измерением.

В своих исследованиях мы изучали само растение как интегральный показатель, совокупности рассмотренных в уравнении процессов, идущих на построение органического вещества растения и измеряли его на разных этапах развития онтогенеза в целом как депо и накопитель всех энергетических и обменных процессов. Для изучения биологических объектов, в т. ч. агроценозов, используется системный подход, который без классического описательного, накопительного этапа, основанного на фактических, эмпирических построениях, невозможно использовать. Поэтому для расчетов влияния ЛП на прилегающее пространство (агроценозы) фактические данные были отобраны в поле, по фазам развития растений и описаны в виде математических зависимостей с использованием вышеописанной методологии. Агрофитоценозы обладают своими закономерностями, динамикой, своими критериями (за повышение продуктивности которых приходится платить снижением устойчивости ценозов), управляющими воздействиями. А управлять невозможно без модели, без знания процессов, происходящих при антропогенном вмешательстве.

3. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ БИОПРОДУКТИВНОСТИ АГРОБИОЦЕНОЗОВ

Методологическая основа исследований агроценозов на орошаемых землях в системе ЛП представлена на рис. 1. В основу анализа положен биологический подход, основоположником которого является Карл Пирсон (1857-1936) – основатель биометрии. Основой биометрии являются эмпирические данные.

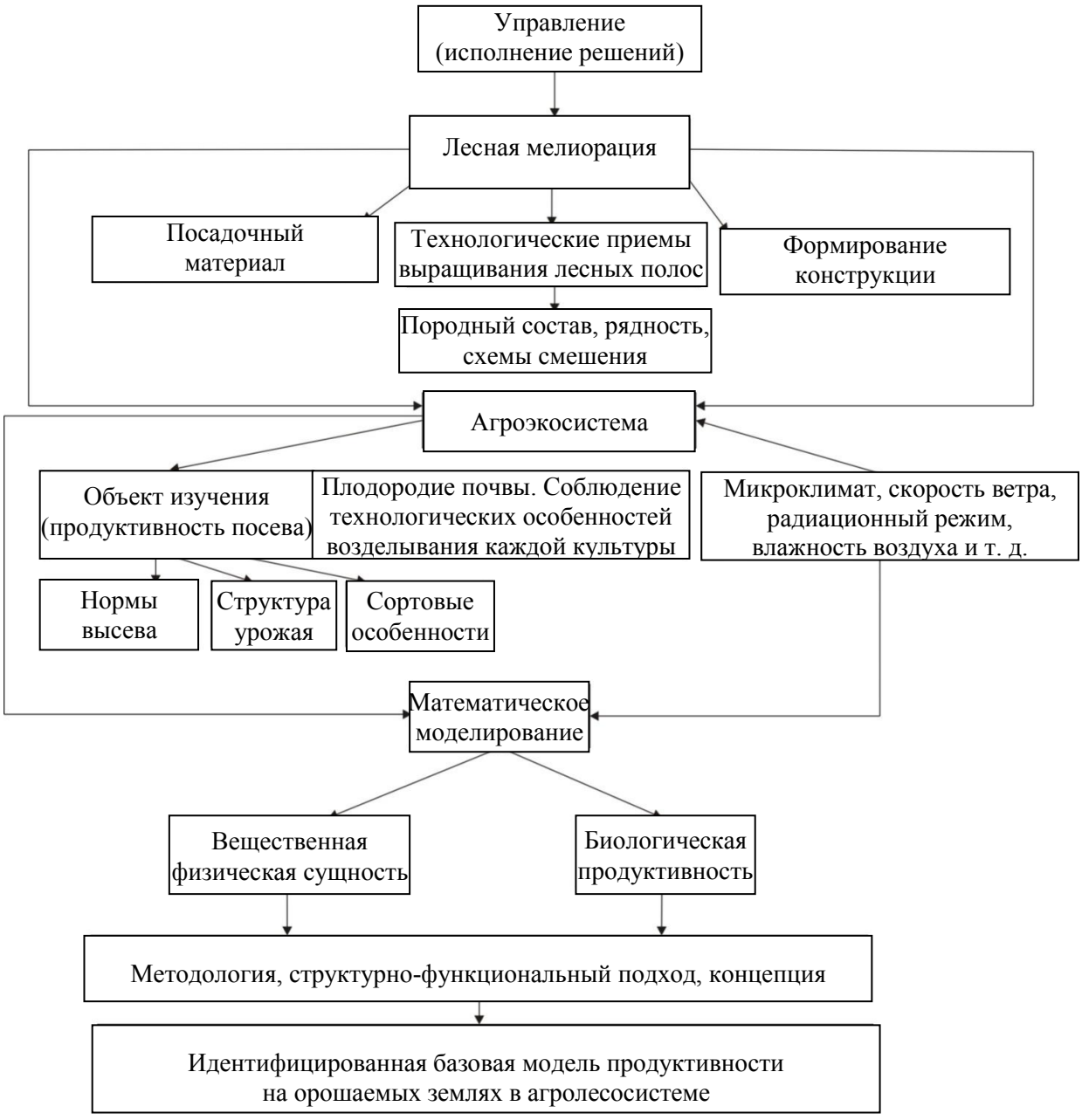

Рис. 1. Схема организации исследований и управления агролесосистемами

Схема организации исследований по биопродуктивности состоит из трех частей: экосистемы межполосной клетки с ЛП, факторов микроклимата, влияющих на развитие агроценоза, и математического моделирования, основанного на теории и закономерностях развития биологических объектов – сельхозкультур. Такой подход позволяет свести все измерения сельхозкультур к высоте растения, динамике биомассы, суточным приростам фотосинтетического потенциала (ФП) и ассимилирующей поверхности культур по фазам развития.

Методологический подход позволяет изучать агроценозы параллельно с теоретическим обоснованием и построением моделей системы.

Поскольку в основе исследований биопродуктивности, которые проводятся по общепринятым методикам, лежат полевые данные, то в данном разделе будет уделяться внимание только оригинальным подходам, разработанным лично авторами.

3.1. Методика отбора образцов сельскохозяйственных культур по малой выборке

Полевой опыт – это работа с большими выборками, объем которых достигает от 200 до 300 случайно отобранных растений, что не всегда удобно. Так, в наших исследованиях по апробации методики по отбору образцов в Николаевском р-не Волгоградской обл. на озимой пшенице под защитой 2-3-рядных ЛП из тополя гибридного, на метровой площадке количество стеблей достигало 250-600 шт. в зависимости от плотности посадки, всхожести, нормы высева и перезимовки растений. Поэтому на разных расстояниях от ЛП (2,5-20Н) по трансекте случайно выбиралось от 215 до 352 растений озимой пшеницы в фазу цветения, что приводило к большой потере биомассы растений.

Согласно нашим исследованиям, морфометрические характеристики агроценозов сельскохозяйственных культур подчиняются закону нормального распределения, так как подавляющее большинство биологических признаков имеет симметричное распределение вариант, близкое нормальному [39, 40]. Согласно неравенству Чебышева из теории вероятностей, "…при любом типе распределения вариант вероятность отклонения последнего от основного закона нормального распределения, так называемого "правила трех сигм", составляет меньше чем 1/9 или равно этому числу. Следовательно, принимая неизвестное распределение вариант за нормальное, можно ошибаться лишь в 11 случаях из 100" [41]. Ранее было выявлено [42], что распределение стеблей озимой пшеницы на межполосном пространстве относится к нормальному непрерывного типа. Точная форма нормального распределения (характерная колоколообразная кривая) определяется только двумя параметрами:

средней величиной M и стандартным отклонением δ. Дисперсия – это центральный момент 2-го порядка. Если 68 % всех наблюдений лежит в диапазоне ±1 стандартного отклонения от среднего, то ±2 стандартных отклонений содержат 95 % значений [43].

Гистограммы распределения высоты стеблей озимой пшеницы в зависимости от расстояния до ЛП представлены на рис. 2.

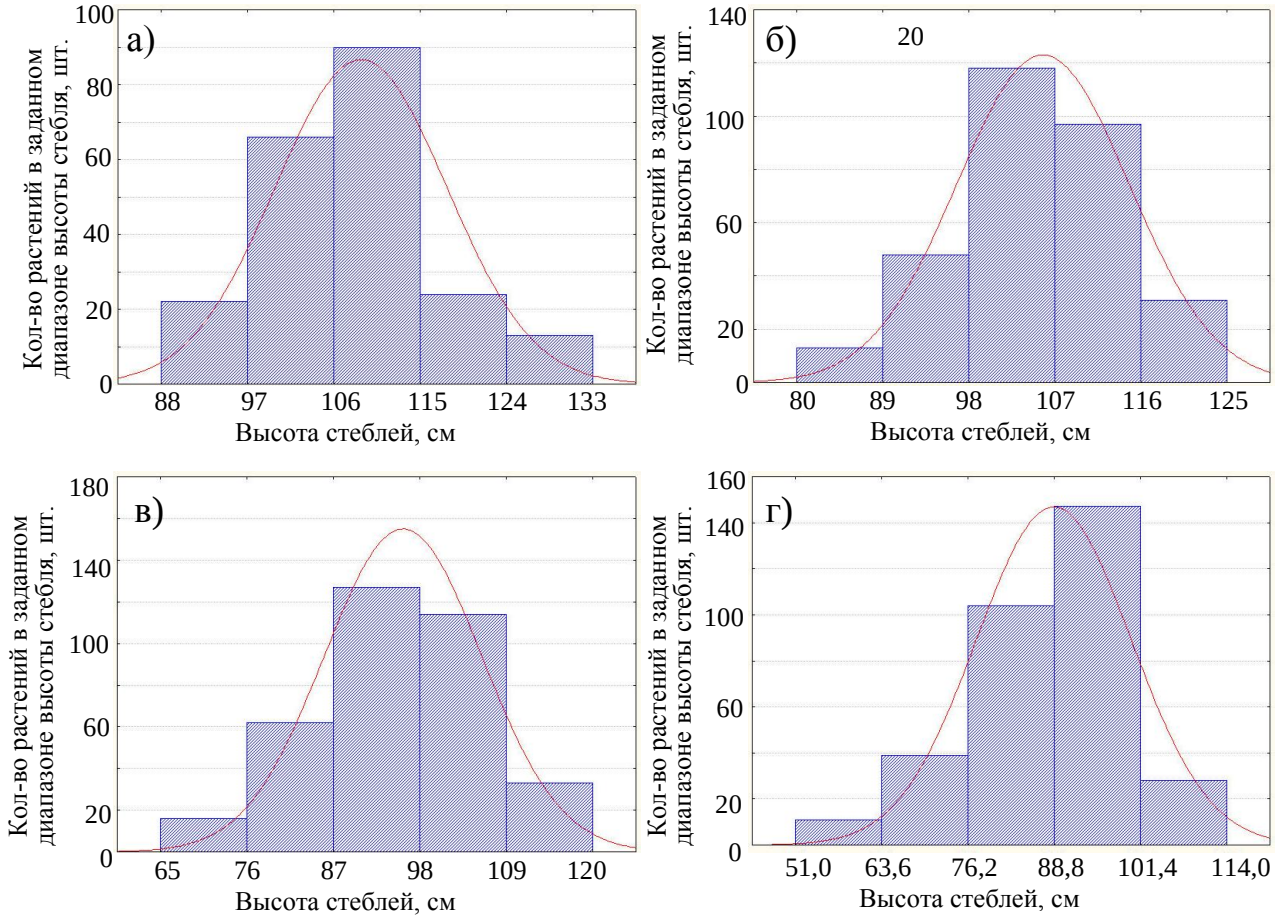

Рис. 2. Распределение высоты стеблей озимой пшеницы на различных расстояниях от ЛП (а – 2,5Н, б – 5Н, в – 10Н, г – 20Н)

Средняя высота стебля равна для 2,5Н – 109 см; 5Н – 106; 10Н – 96; 20Н – 89 см. Среднее квадратическое отклонение (дисперсия) соответственно равно 79,4; 80,3; 99,3; 126,8. Стандартное отклонение соответственно равно 8,9; 8,96; 9,97; 11,3. Анализ показал, что математически средние характеристик растений из малой выборки достоверны по значимости растениям из случайно выбранных большой выборки. Мода равна: 2,5Н – 110; 5Н – 110; 10Н – 105; 20Н – 95. Для дальнейшего анализа строится малая выборка из математически средних частот большой генеральной совокупности с доверительным интервалом ±95 %. Поскольку выборка из стеблей пшеницы построена на основе закона нормального распределения, то для проверки различий между генеральной совокупностью и малой выборкой большей значимостью обладают па-

раметрические критерии оценки совокупностей, одним из которых является *t*-критерий Стьюдента (табл. 2). Закон *t*-распределения служит основой так называемой теории малой выборки, которая характеризует распределение выборочных средних в нормально распределяющейся совокупности в зависимости от объема выборки [44].

Таблица 2

Сравнительная оценка совокупностей большой и малой выборок по критерию Стьюдента

Расстояние от ЛП, Н	Распределение Стьюдента	
	большая выборка	малая выборка
2,5	2,64E-190	2,97E-19
5	4,75E-172	3,73E-19
10	9,84E-165	1,09E-18
20	7,61E-179	3,55E-18

Принимая за основу H_0-гипотезу, фактически получаемая t_{cm} должна быть меньше $t_{кр}$ ($t_{кр}$ = 1,97) для принятого уровня значимости (P = 0,05).

Сравнительный анализ двух выборок стеблей озимой пшеницы для расстояний 2,5-20Н по двухвыборочному *t*-тесту с различными дисперсиями (табл. 3) показал, что принимаемая гипотеза верна и достоверных различий между выборками нет: $t_{2,5Н}$ = –1,41; $t_{5Н}$ = –3,57; $t_{10Н}$ = –5,61; $t_{20Н}$ = –3,21; $t_{2,5\text{-}20Н} < t_{кр}$. Следовательно, для дальнейшего анализа в лаборатории возможен отбор 10-15 растений из малой выборки. По гистограмме распределения либо из статистической оценки большой выборки можно отбирать либо модальные, либо "математически" средние растения.

Таблица 3

Показатели двухвыборочного t-теста с различными дисперсиями

Характеристики t-теста	Большая/малая выборка			
	2,5Н	5Н	10Н	20Н
Среднее	108,26/107,38	105,61/105,48	95,69/96,75	88,53/88,67
Дисперсия	133,06/0,26	80,34/0,71	99,34/0,42	126,79/2,11
Наблюдения	215,00/13,00	307,00/54,00	352,00/28,00	329,00/36,0
Гипотетическая разность средних	2,00/-	2,00/-	2,00/-	2,00/-
df	224,00/-	333,00/-	375,00/-	358,00/-
t_{cm}	–1,41/-	–3,57/-	–5,61/-	–3,21/-
P (T ≤ t) одностороннее	0,08/-	0,00/-	0,00/-	0,00/-
$t_{кр}$ одностороннее	1,65/-	1,65/-	1,65/-	1,65/-
P (T ≤ t) двухстороннее	0,16/-	0,00/-	0,00/-	0,00/-
$t_{кр}$ двухстороннее	1,97/-	1,97/-	1,97/-	1,97/-

По разработанной методике были написаны программы для ЭВМ "Определение оптимального количества образцов пшеницы по главным стеблям в защищенных агрофитоценозах" и "Определение размера малой выборки масличных культур в зоне влияния лесных полос", на которые были получены свидетельства о государственной регистрации (приложение А, Б) [45, 46].

В программе "Определение оптимального количества образцов пшеницы по главным стеблям в защищенных агрофитоценозах" проводится анализ большой выборки растительных образцов пшеницы (до 400 шт.) в защищенном агроценозе. По фактическим данным высоты растений, полученным в поле, и заданному размеру малой выборки рассчитывается вероятность распределения количества образцов, подчиняющихся закону нормального распределения (рис. 3). По полученным данным строятся графики распределения высоты стеблей на разном расстоянии от ЛП (рис. 4).

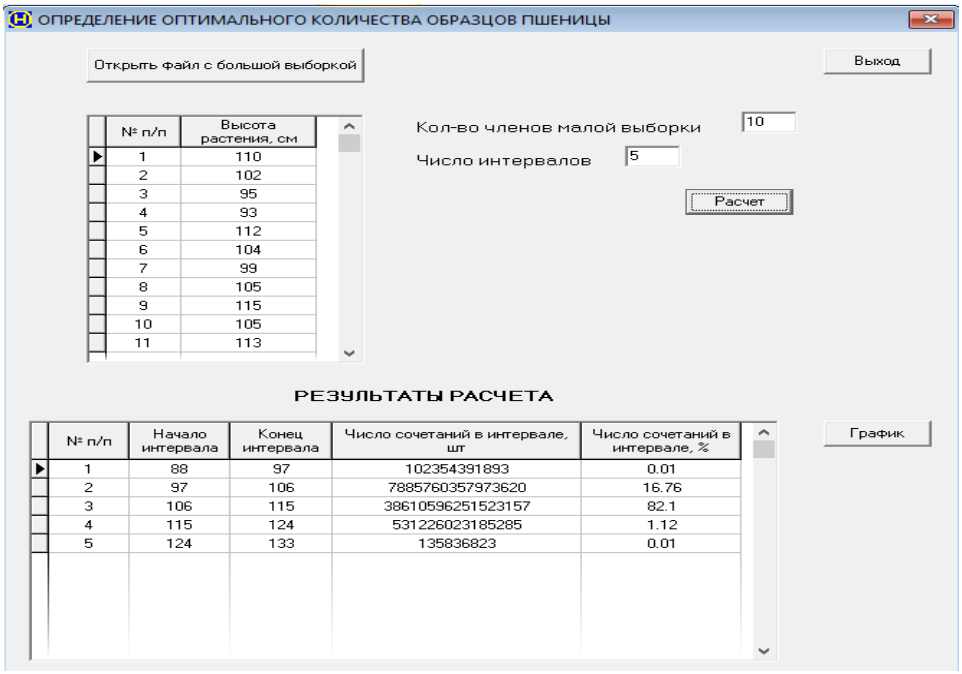

Рис. 3. Окно ввода исходных данных и вывода результатов расчета оптимального количества членов малой выборки пшеницы

В программе "Определение размера малой выборки масличных культур в зоне влияния лесных полос" по количеству стеблей в метровых площадках, в зависимости от плотности посадки, всхожести, нормы высева определяем растения, которые статистически обрабатываем для оценки значимости большой выборки. Рассчитывается среднее значение, стандартное отклонение, дисперсия, эксцесс, асимметрия, минимум, максимум, процент элементов в интервале. Результаты расчетов выводятся в виде графиков нормального распределения непрерывного типа (рис. 5). По гистограмме распределения либо из статистической оценки большой выборки можно отбирать "математически" средние растения. На основании данных строится малая выборка из математически средних частот большой генеральной совокупности с доверительным интервалом 95 %.

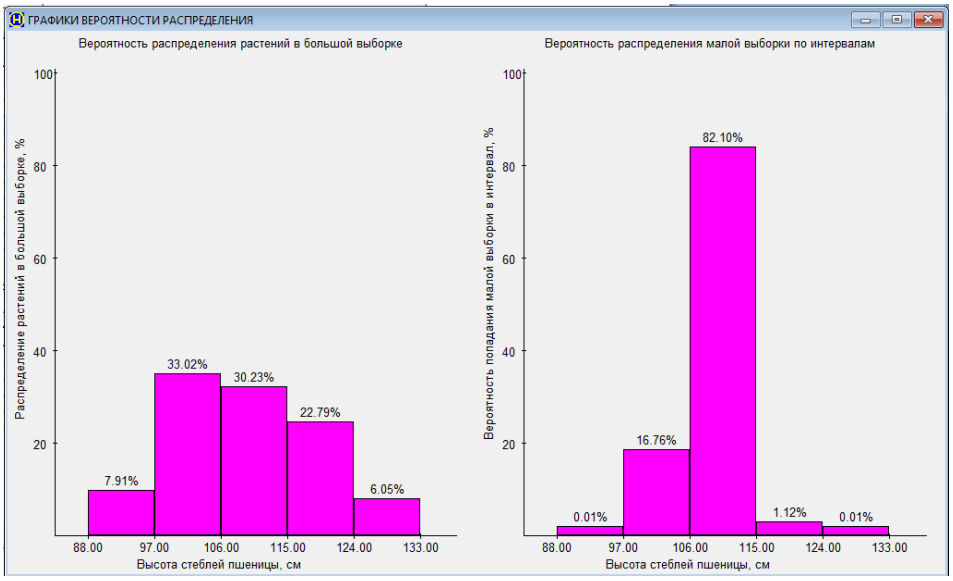

Рис. 4. Окно вывода гистограммы нормального распределения высоты стеблей пшеницы

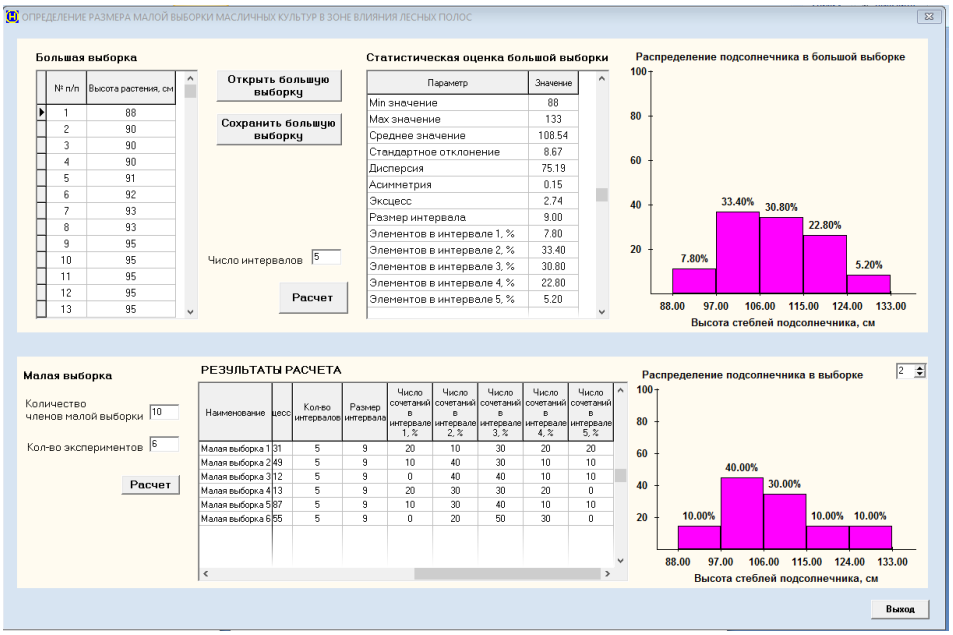

Рис. 5. Экранное изображение окна программы определения размера малой выборки масличных культур

3.2. Методика определения динамики и биометрических параметров растений

Для научных исследований проводятся морфометрические измерения на пробных площадях. Внутри экосистемы рассматриваются расстояния, равные 2,5; 5; 10; 15; 25 и 35Н лесной полосы. Контролем при относительно больших расстояниях служит середина межполосной клетки.

Общие закономерности размещения агрофитоценозов устанавливаются при рекогносцировке. Границы агрофитоценозов уточняются по площади, облесенной ЛП. Маршрут намечается перпендикулярно ЛП по трансекте. Для изучения функционирования и системного подхода в оценке фитоценозов и сорняков разработана единая схема их обследования:

1. Номер ЛП, дата, описание.
2. Общие закономерности размещения агрофитоценозов относи-

тельно ЛП.

3. Наименования агрофитоценоза. При составлении наименования учитывались не только культивируемые растения, занимающие господствующее положение, но и наиболее характерные виды сорных растений.

4. Агрономическая характеристика почвы.

5. Фитометрические наблюдения, включающие характеристики продуктивности посевов. Их основой служили наблюдения за динамикой развития сельскохозяйственных культур – густотой культурных растений (норма высева и/или подсчет на 1 м^2 с дальнейшим пересчетом на гектар), приростом по фазам развития вегетативных и генеративных органов, засоренностью, равномерностью распределения культурных и сорных растений и их состоянием, сложением, селективностью, преобладающими видами сорных растений, количеством стеблей (кустистость), общей высотой растений, числом листьев, диаметром стебля, массой 1000 зерен и т. д.

6. Плотность агрофитоценоза. Плотность травостоя определялась путем подсчета числа побегов культурных и сорных растений на площади 1/4 м^2 (50 х 50 см) в пятикратной повторности (4 квадрата по углам пробной площади и один в середине). Среди сорных растений отдельно учитывались лишь наиболее распространенные виды, остальные были объединены в группы [47]. Этот подход хорошо отражает степень диффузности распространения растений на площади агрофитоценоза и применяется также для оценки константности видов.

Площадь листьев *П* определяется по формуле В. В. Аникеева и Ф. Ф. Кутузова для злаковых культур (пшеницы и кукурузы) [48]:

$$П = d \cdot ш \cdot k, \qquad (6)$$

где d – длина листа, см; $ш$ – ширина листа, см; k – поправочный коэффициент (для злаков 0,67).

Для масличных культур (подсолнечник) можно использовать два метода расчета площади листьев: *метод отпечатков* и *метод высечек*.

Метод отпечатков. Лист растения накладывают на бумагу и обводят по контуру листовой пластинки, вырезают и, получив отпечаток листа, определяют его вес на торсионных весах. Одновременно из такой же бумаги вырезают квадрат площадью 100 см^2 и также определяют его массу. Площадь исследуемого листа S находят по формуле:

$$S = m_л \cdot S_б / m_б, \qquad (7)$$

где $m_л$ – масса контура листа, мг; $S_б$ – площадь квадрата бумаги, см^2; $m_б$ – масса квадрата бумаги, мг;

Метод высечек основан на отборе листьев растений и их взвешивании. Затем на пробе листьев делают высечки заданного диаметра и определяют их вес. Площадь листьев рассчитывают по формуле:

$$S = m_{общ} \cdot S_в / m_в, \qquad (8)$$

где $m_{общ}$ – общая масса сырых листьев, г; $S_в$ – общая площадь высечек, см^2; $m_в$ – общая масса сырых высечек, г.

Из всех характеристик продуктивности высота растений H_p – это практически единственный точно определяемый показатель. Между тем высота растительного покрова тесно связана с другими фитометрическими показателями: площадью листьев, надземной фитомассой [49-51], что делает эту характеристику перспективной при определении параметров, более сложных в методическом отношении.

Для описания роста сельскохозяйственных культур H_p за период вегетации была выведена формула:

$$H_p = \frac{H_{max} - H_{min}}{1 + e^{a - b\tau}} + H_{min}, \quad (9)$$

где H_{min} – высота растения во время посева, H_{max} – максимальная высота растения, τ – время вегетации, e – основание натуральных логарифмов, a и b – константы, определяющие наклон, изгиб и точку перегиба кривой.

В относительных единицах период вегетации приравнивается единице, дни выражаются в ее долях:

$$H_\Delta = \frac{H_p - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} = \frac{1}{1 + c \cdot e^{a - b\tau}} = \frac{1}{1 + c \cdot e^{-b\tau}}, \quad (10)$$

при $H_{min} = 0$

$$H_\Delta = \frac{H_p}{H_{max}} = \frac{1}{1 + c \cdot e^{-b\tau}}, \quad (11)$$

где $c = e^a$ [42].

Чтобы управлять агрофитоценозами иногда достаточно знать прирост в высоту растений на отдельно взятой фазе развития. Для этого от логистической функции берется первая производная

$$H' = \left(\frac{H_{max}}{1 + e^{a - b\tau}}\right)' = -H_{max}(1 + e^a e^{-b\tau})^{-2}(e^a e^{-b\tau})' =$$
$$= H_{max} \cdot b \cdot e^a \cdot e^{-b\tau}(1 + e^a e^{-b\tau})^{-2} =$$
$$= \frac{H_{max} \cdot b \cdot e^{a - b\tau}}{(1 + e^{a - b\tau})^2} = H_{max} \cdot b \cdot e^{a - b\tau} {H_\Delta}^2. \quad (12)$$

Для моделирования пространственной динамики высоты растений применялась экспоненциальная зависимость:

$$H_\Delta = H_{\Delta k} + a \cdot e^{bL_н}, \quad (13)$$

где H_Δ – максимальная высота кукурузы на разном расстоянии от ЛП; $H_{\Delta k}$ – высота на контроле; a, b – параметры уравнения; $L_н$ – расстояние от ЛП.

Для описания биомассы сельскохозяйственных культур за период вегетации в абсолютных единицах в общем виде применялась формула:

$$M = \frac{M_{max} - M_{min}}{1 + e^{a - b\tau}} + M_{min}. \quad (14)$$

В относительных единицах для всех случаев:

$$M_{\Delta} = \frac{M - M_{min}}{M_{max} - M_{min}} = \frac{1}{1 + e^{a - b\tau}}. \quad (15)$$

При $M_{min} = 0$ в абсолютных единицах:

$$M = \frac{M_{max}}{1 + e^{a - b\tau}}. \quad (16)$$

В относительных единицах при $M_{min} = 0$:

$$M_{\Delta} = \frac{M}{M_{max}} = \frac{1}{1 + e^{a - b\tau}}, \quad (17)$$

где M – биомасса растения, M_{Δ} – биомасса растения в относительных единицах, M_{min} – биомасса растения во время посева ($\tau = 0$, $M_{min} = 0$), M_{max} – максимальная биомасса растения (сырая или сухая) в конце вегетации, τ – время вегетации, e – основание натуральных логарифмов, a и b – константы, определяющие наклон, изгиб и точку перегиба кривой.

Уравнения логистической функции для определения биомассы растений позволяют создавать прогнозные модели для всех сельхозкультур на орошаемых агролесоландшафтах. Высокий урожай может быть получен при стабильных суточных приростах сухого вещества [52], процедура нахождения которых очень трудоемка и требует большой затраты времени. Суточные приросты сухого вещества растений могут быть получены как произведение чистой продуктивности фотосинтеза на площадь листьев в момент отбора образца в поле. На основе математического моделирования нами упрощена методика их вычисления. Для этого от логистической функции (16) берется первая производная M'.

$$M' = \left(\frac{M_{max}}{1 + e^{a - b\tau}}\right)' = - M_{max}(1 + e^{a}e^{-b\tau})^{-2}(e^{a}e^{-b\tau})' =$$

$$= M_{max} \cdot b \cdot e^{a}e^{-b\tau}(1 + e^{a}e^{-b\tau})^{-2} = \frac{M_{max} \cdot b \cdot e^{a - b\tau}}{(1 + e^{a - b\tau})^{2}} =$$

$$= M_{max} \cdot b \cdot e^{a - b\tau} \cdot {M_{\Delta}}^{2}, \quad (18)$$

где a, b – параметры уравнения. Таким образом, в результате расчетов получаем, что суточные приросты сухой и сырой биомассы есть первая производная логистической функции. При необходимости можно получить приближенное значение скорости роста за любой день.

Для моделирования пространственной динамики продуктивности применялась экспоненциальная зависимость:

$$M = a \cdot e^{-bL_H}, \quad (19)$$

где M – элемент продуктивности; a, b – коэффициенты.

Для обоснования физиологических и физических процессов под влиянием ЛП экспонента бралась в виде:

$$M - M_k = (M_0 - M_k)e^{-bL_H}. \quad (20)$$

На границах

$$\begin{cases} e^{-bL_H} = 1, a = M_0 - M_k \text{ если } L_H = 0 \\ e^{-bL_H} = 0, M = M - M_k \text{ если } L_H \to \infty \end{cases}. \quad (21)$$

В относительном виде формула принимает вид:

$$M_\Delta = M - M_k = a \cdot e^{-bL_H}, \quad (22)$$

где M_0 – элемент продуктивности при $L_H = 0$; M_k – максимальное значение элемента продуктивности без ЛП.

Обобщенное уравнение имеет вид:

$$M = M_k + a \cdot e^{-bL_H}, \quad (23)$$

где

$$a = M_0 - M_k. \quad (24)$$

Деятельностью ассимилирующей поверхности растений характеризуется величина урожая, который зависит от размера листового аппарата, его количества и времени активной деятельности. Поэтому при исследовании динамики нарастания ассимилирующей поверхности особый интерес представляла ее площадь, размерами которой определяется количество поглощенной солнечной радиации, идущей на построение хозяйственно ценной части урожая. Зная площадь листьев и густоту посева, можно рассчитать ассимилирующую поверхность растений за вегетационный сезон по формуле:

$$A_c = S \cdot N \cdot B, \quad (25)$$

где A_c – ассимилирующая поверхность, см^2/га; N – норма высева, тыс. раст./га; B – количество листьев на одном растении.

Интегральным показателем листовой массы является ФП. Он характеризует фотосинтетическую работу посева за вегетацию и определяется суммированием площади листьев за этот период:

$$\Phi_п = \frac{\sum_{i=1}^{5} A_c K_д}{1000}, \quad (26)$$

где $Ф_п$ – фотосинтетический потенциал, млн м^2/га·сутки; $K_д$ – количество дней, соответствующее определенной фазе развития кукурузы; i – количество фаз развития.

Используя метод математического моделирования при расчете динамики ФП в зоне влияния ЛП, получили аналитическое уравнение, которое позволило описать многолетние осредненные данные экспоненциальной зависимостью:

$$\Phi_п = \Phi_\Delta + a \cdot e^{-bL_H} \Big| \begin{matrix} L_H = 0; \quad \Phi_п = \Phi_\Delta + a \\ L_H = \infty; \quad \Phi_п = \Phi_\Delta \end{matrix}, \quad (27)$$

$$a = \Phi_o - \Phi_K; \; \Phi_\Delta = \Phi_{ср} - \Phi_K, \quad (28)$$

где $Ф_{ср}$ – средняя величина ФП на данном расстоянии от ЛП; $Ф_о$ – теоретический фотосинтетический потенциал; $Ф_К$ – фотосинтетический потенциал на контроле; a и b – коэффициенты.

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ОРОШАЕМЫХ ЛЕСОЛАНДШАФТАХ

4.1. Динамика высоты сельскохозяйственных культур

Природные явления, в той или иной мере, взаимосвязаны между собой и относятся к сложным системам. Поэтому в основе их динамики лежат общие закономерности развития, подчиняющиеся физическим законам, которые можно описать языком цифр. Для моделирования процессов в этих системах логистическая функция является механизмом, с помощью которого многие поколения исследователей пытаются не только описать, но и объяснить динамику развития нелинейных процессов.

Исследования были проведены на кукурузе, различающейся сортами и гибридами и биологическим временем развития (поздне- и среднеспелые) (табл. 4).

Таблица 4

Динамика роста кукурузы (см) на разном расстоянии от ЛП

Дата наблюдений	День вегетации	Расстояние от ЛП, Н					Контроль
		2,5	5	10	15	20	
1	2	3	4	5	6	7	8
ВИР-156 ТВ, срок вегетации 130-150 дней							
06.06	10	10,4	8,7	8,9	10,1	7,5	6,4
17.06	21	18,0	22,8	21,2	22,5	18,7	22,0
10.07	45	110,0	66,0	84,2	68,0	90,8	68,8
12.08	88	208,0	201,0	189,5	177,0	173,0	153,0
ВИР-156 ТВ, срок вегетации 130-150 дней							
30.06	20	61,3	61,9	49,2	57,8	51,5	51,9
04.08	45	206,3	219,2	193,0	191,3	160,0	140,5
VC-183, срок вегетации 130-150 дней							
01.07	30	72,5	74,2	63,0	65,3	62,2	63,9
12.07	41	107,4	105,8	108,4	102,6	103,6	89,0
03.08	67	235,2	238,8	224,2	202,0	226,0	204,6
Днепровский 98 МВ, срок вегетации 100-115 дней							
31.05	33	10,3	8,9	6,7	10,1	7,9	-
13.06	47	13,8	16,8	14,2	15,7	16,0	-
05.07	69	205,4	211,0	200,6	201,4	193,0	-
26.07	90	312,0	306,8	278,1	288,4	281,4	-
05.09	105	312,0	306,8	278,1	288,4	281,4	-

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8
Гибрид Элора, срок вегетации 110-115 дней							
21.07	65	167,7	170,4	180,4	199,4	190,8	123,0
20.08	95	233,0	204,0	197,0	210,0	199,0	183,0
16.09	110	229,0	209,0	197,0	210,2	199,0	180,0
Гибрид Элора, срок вегетации 110-115 дней							
08.06	23	13,6	12,7	-	10,4	-	13,1
13.07	58	155,2	131,6	-	122,4	-	100,6
28.09	100	248,0	197,0	-	216,0	-	184,0

ВИР-156 ТВ – двойной межлинейный гибрид, районирован для Волгоградской обл., выведен на Кубанской опытной станции ВИР совместно с Краснодарским НИИСХ скрещиванием простых гибридов Надежда Т и Невед ТВ. Растения высокорослые, среднекустящиеся. Листьев на главном стебле около 20. Устойчивость к полеганию высокая. Початок круглый, цилиндрический, слабоконусовидный, рядов зерен 18-20. Выход зерна 80-82 %. Зерно желтое, зубовидное. Масса 1000 зерен 260-300 г. Позднеспелый, вегетационный период 135 дней [53].

Днепровский 98 МВ – тройной межлинейный гибрид, среднеранneспелый (ФАО-200). Морфологические признаки: стебель высотой 200-230 см, слабокустящийся, устойчивость к полеганию средняя. Початок слабоконусовидной формы длиной 17-19 см, количество рядов зерен 14-16. Зерно полузубовидное, желтого цвета, масса 1000 зерен 240-260 г. Устойчивость к поражению болезнями выше средней [54].

Американский сорт Элора фирмы Pioneer. Среднеспелый, устойчив к полеганию, высокая энергия прорастания семян, высокая урожайность в данной группе спелости. Рекомендуется для выращивания на зерно. Густота стояния во влажных зонах 65-75, в сухих 55-65 тыс. раст./га [55].

Югославский гибрид VC-183. Позднеспелый, устойчив к полеганию, высокая энергия прорастания семян. Высота стебля 200-230 см. Рекомендуется для выращивания на зерно.

С целью упрощения информации, не представляющей научного интереса, фактические года были заменены на условные или приравнены к культурам, выращиваемым в этот период. Для приведения к единым единицам измерения времени вегетации данные были нормированы: позднеспелые гибриды приравнивались к 130 дням (τ = 130); среднеспелые к 110 (τ = 110). Для расчета высоты кукурузы за период вегетации использована методика, описанная в гл. 3.2, формулы (9)-(11). Графики зависимости динамики высоты кукурузы за период вегетации в межполосном пространстве представлены на рис. 6, параметры логистической зависимости – в табл. 5.

Графики зависимости имеют вид S-образных кривых и описываются логистами. По литературным данным [50], скорость роста стебля связана с сортовыми и гибридными особенностями кукурузы и этапом органогенеза.

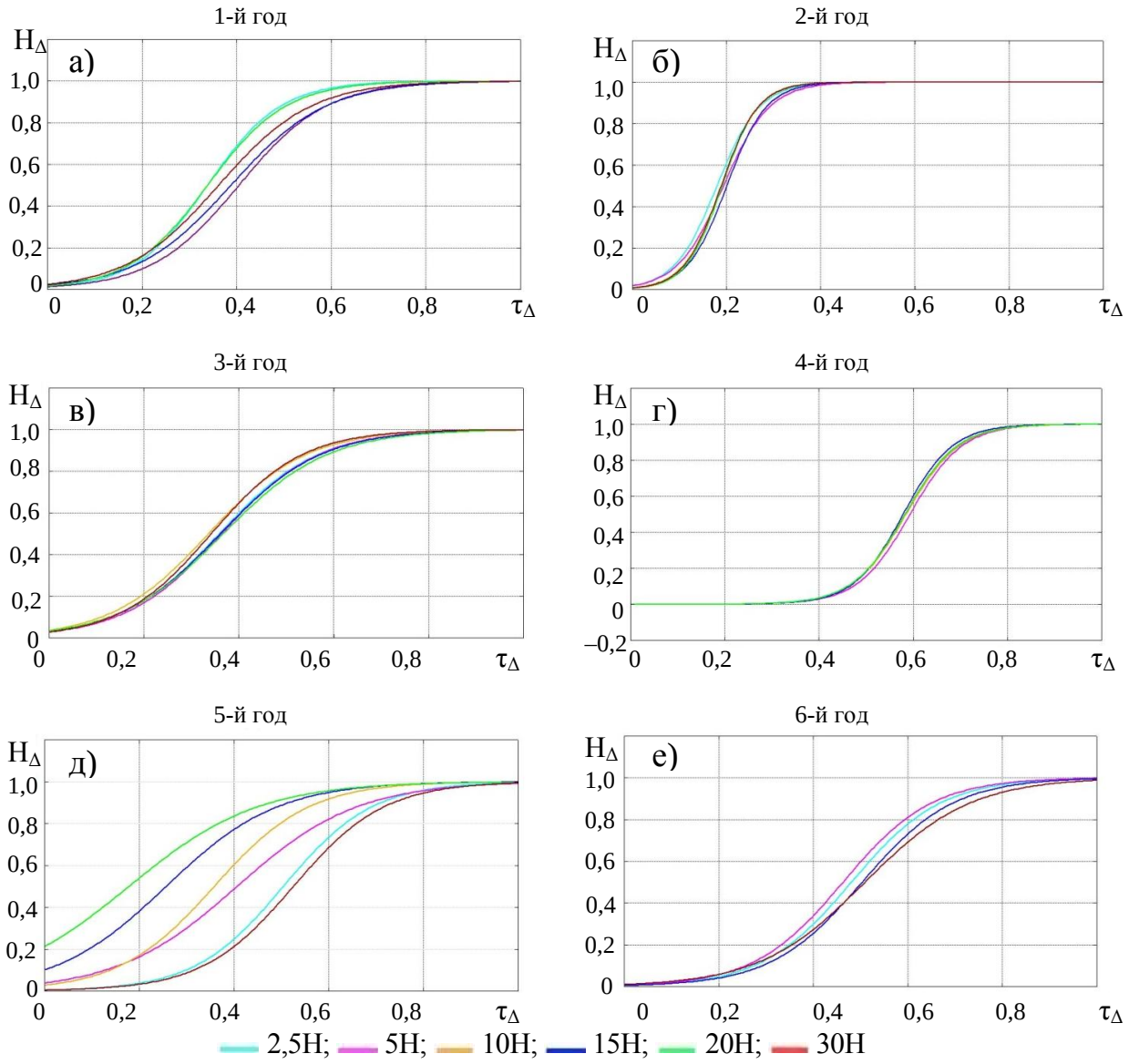

Рис. 6. Динамика роста кукурузы в нормированных единицах $H_Д$ на разном расстоянии от ЛП (а, б – ВИР-156 ТВ; в – VC-183; г – Днепровский 98 МВ; д, е – гибрид Элора) по годам наблюдений

Гибридные особенности кукурузы выражаются в различиях стеблей по высоте, расположению початков, прохождению фаз роста и развития, неодинаково реагирующих на минеральное почвенное питание, свет, содержание углекислого газа [49]. Так, в нашем случае в отдельные годы ускорение в нарастании начинается при τ = 0,08-0,10 (см. рис. 6а, б), в другие при τ = 0,2 (см. рис. 6в); и τ = 0,45 (см. рис. 6г); у гибридов Элора – при τ = 0,3 (см. рис. 6д, е), что также подтверждается сортовыми и гибридными особенностями кукурузы. Изгиб в кривой соответствует началу быстрого роста растений. Биологическая сущность этого процесса объясняется окончанием формирования зачаточного початка [56], в растении определяется объем необходимого количества ассимилятов для заполнения репродуктивных органов. Дальнейшая деятельность растений направлена на быстрое формирование необходимой площади ас-

Таблица 5

Зависимость H_{max} и параметров уравнения *a* и *b* от расстояния до ЛП по годам

Расстояние от ЛП, Н	Параметры уравнения			Расстояние от ЛП, Н	Параметры уравнения		
	H_{max}	*a*	*b*		H_{max}	*a*	*b*
1-й год				*4-й год*			
2,5	209	3,38	–0,08	2,5	316	8,01	–0,13
5	203	3,43	–0,07	5	310	8,11	–0,13
10	191	3,36	–0,07	10	280	8,60	–0,14
15	180	3,08	–0,06	15	291	8,03	–0,13
20	174	3,32	-0,07	20	284	8,20	–0,13
Контроль	154	3,27	–0,07	Контроль	-	-	-
2-й год				*5-й год*			
2,5	210	4,82	–0,20	2,5	234	5,31	–0,10
5	223	4,98	–0,20	5	210	5,28	–0,10
10	199	4,78	–0,18	10	198	5,01	–0,10
15	195	4,72	–0,19	15	211	4,97	–0,10
20	167	3,97	–0,16	20	200	4,83	–0,10
Контроль	144	3,98	–0,17	Контроль	185	5,12	–0,10
3-й год				*6-й год*			
2,5	268	3,58	–0,08	2,5	250	5,07	–0,10
5	296	3,20	–0,07	5	198	4,86	–0,10
10	276	3,38	–0,07	10	-	-	-
15	235	3,48	–0,08	15	218	5,09	–0,10
20	276	3,50	–0,07	20	-	-	-
Контроль	245	3,40	–0,07	Контроль	187	4,34	–0,08

Примечание. H_{max} – максимальная высота кукурузы, a и b – константы, определяющие наклон, изгиб и точку перегиба кривой.

симилирующей поверхности, а значит и интенсивный рост, что видно на кривых (прямолинейный участок логисты). Выход на плато насыщения, соответствующий прекращению развития, отмечается при τ = 0,75-0,85 в среднем по годам (см. рис. 6а, в-е), в годы с ухудшением погодных условий окончание роста происходит уже при τ = 0,4 (см. рис. 6б). Температура воздуха снижалась до 9 ^{o}C, что не соответствовало оптимальному росту кукурузы. Несколько отличается и угол наклона кривой логисты ("всплеск" роста) (см. рис. 6б). Объясняется это интенсивным ростом за счет резкой смены температур воздуха. Возобновление вегетации, увеличение высоты стебля и развитие начались одновременно и очень интенсивно [49].

Динамика развития растений в высоту за вегетацию позволяет выявить проблемы при возделывании этой культуры на отдельных этапах прироста растений – недостаток элементов минерального, органического питания, влаги, угнетение от болезней и т. д. Анализ прироста высоты кукурузы в течение вегетации на разном расстоянии от ЛП представляет особый интерес и рассчитан по собственной методике согласно формуле (12).

Графики зависимости суточных приростов *H′* стеблей растений отражены на рис. 7. Были также рассчитаны декадные показатели прироста в высоту кукурузы за 6 лет (табл. 6). Разница в высоте вершин куполов очевидна и колеблется по годам в зависимости от условий года и гибридных особенностей. На всех расстояниях от ЛП в межполосном пространстве прирост стебля был больше, чем на контроле, за счет лучших микроклиматических условий в зоне лесомелиоративного влияния. Однако наименьший прирост стебля кукурузы наблюдался в 1-й год (4 см/сут), так как за период вегетации выпало всего 30 мм осадков.

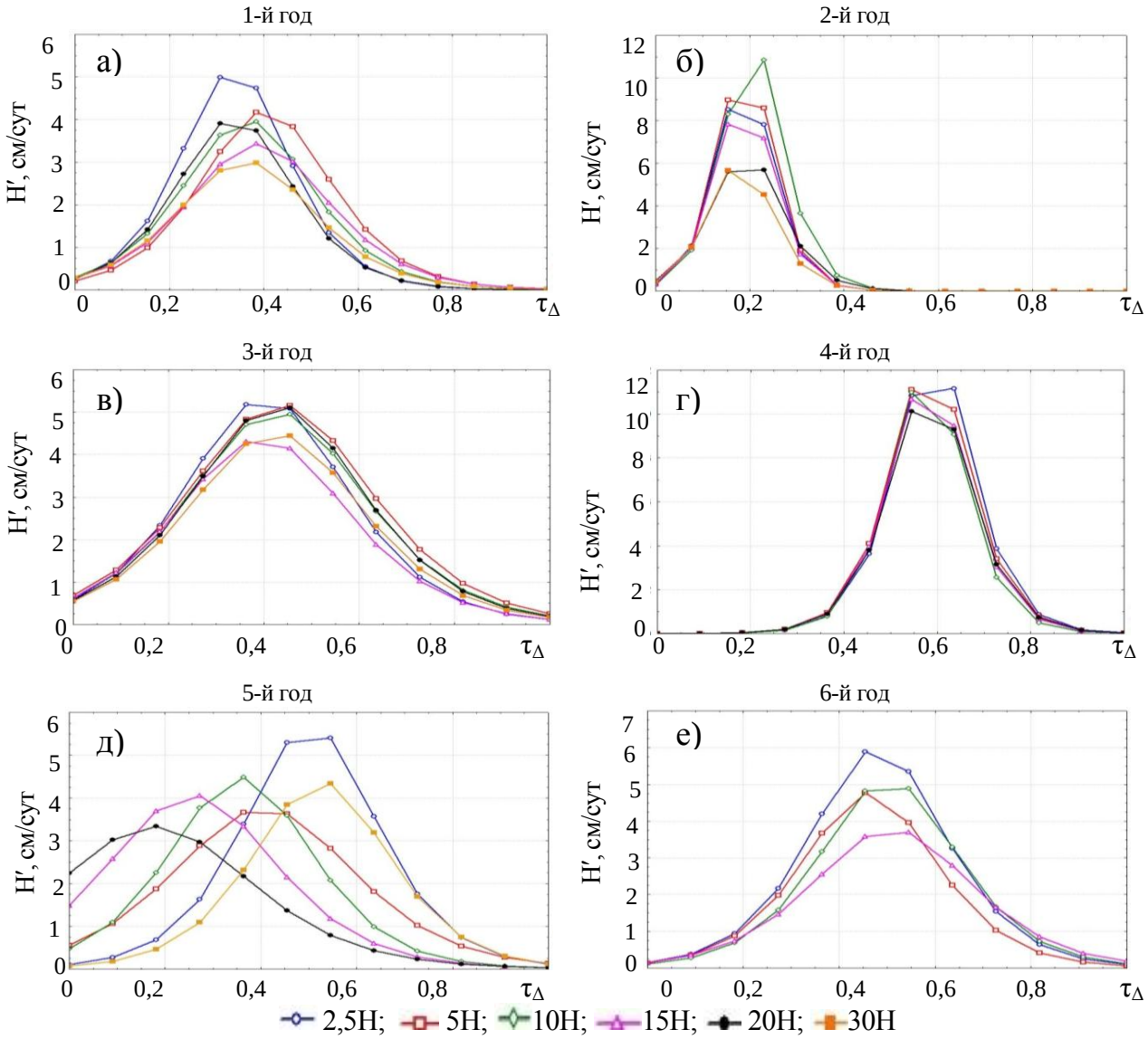

Рис. 7. Суточные приросты стеблей растения на разном расстоянии от ЛП (а, б – ВИР-156 ТВ; в – VC-183; г – Днепровский 98 МВ; д, е – гибрид Элора) по годам наблюдений

На 2-м году была резкая смена температур в весенне-летний период. Прирост стебля наибольший по сравнению с другими годами (11 см/сут), нарастание биомассы стебля прекращается при $\tau = 0{,}4$.

Таблица 6

Динамика прироста высоты стеблей кукурузы по годам

τ	H′, см/сут						τ	H′, см/сут					
	2,5H	5H	10H	15H	20H	30H		2,5H	5H	10H	15H	20H	30H
1-й год							*4-й год*						
0	0,259	0,208	0,291	0,280	0,262	0,287	0	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	-
10	0,669	0,463	0,640	0,573	0,632	0,595	10	0,006	0,008	0,005	0,007	0,008	-
20	1,615	0,989	1,328	1,117	1,419	1,157	20	0,031	0,039	0,025	0,036	0,038	-
30	3,325	1,944	2,446	1,976	2,722	1,995	30	0,159	0,194	0,143	0,181	0,185	-
40	4,990	3,250	3,633	2,951	3,908	2,807	40	0,799	0,947	0,785	0,901	0,891	-
50	4,740	4,172	3,951	3,442	3,743	2,983	50	3,636	4,105	3,819	3,958	3,799	-
60	2,910	3,841	3,068	3,016	2,430	2,355	60	10,846	11,121	10,982	10,678	10,129	-
70	1,351	2,598	1,825	2,054	1,215	1,465	70	11,168	10,212	9,076	9,460	9,295	-
80	0,548	1,419	0,922	1,173	0,531	0,784	80	3,874	3,407	2,549	3,041	3,146	-
90	0,210	0,688	0,429	0,605	0,218	0,386	90	0,859	0,764	0,497	0,665	0,717	-
100	0,079	0,315	0,192	0,296	0,088	0,182	100	0,171	0,156	0,090	0,133	0,148	-
110	0,029	0,140	0,084	0,141	0,035	0,085	110	0,033	0,031	0,016	0,026	0,030	-
120	0,011	0,062	0,037	0,066	0,014	0,039							
130	0,004	0,027	0,016	0,031	0,005	0,018							
2-й год							*5-й год*						
0	0,330	0,307	0,301	0,331	0,484	0,440	0	0,104	0,563	0,478	1,488	2,239	0,073
10	2,133	2,092	1,911	2,048	2,035	2,069	10	0,270	1,065	1,094	2,578	3,020	0,185
20	8,521	8,964	8,295	7,825	5,609	5,664	20	0,686	1,872	2,256	3,694	3,338	0,462
30	7,813	8,592	10,846	7,171	5,695	4,528	30	1,637	2,889	3,771	4,058	2,964	1,097
40	1,796	1,925	3,645	1,720	2,104	1,282	40	3,392	3,665	4,489	3,334	2,165	2,314
50	0,273	0,281	0,730	0,273	0,503	0,255	50	5,297	3,636	3,588	2,152	1,368	3,840
60	0,039	0,038	0,132	0,040	0,108	0,047	60	5,404	2,826	2,074	1,185	0,788	4,338
70	0,005	0,005	0,023	0,006	0,022	0,009	70	3,573	1,812	0,987	0,596	0,430	3,189
80	0,001	0,001	0,004	0,001	0,005	0,002	80	1,756	1,025	0,428	0,287	0,228	1,695
90	0	0	0,001	0	0,001	0	90	0,741	0,540	0,178	0,135	0,119	0,753
100	0	0	0	0	0	0	100	0,293	0,274	0,073	0,063	0,062	0,308
110	0	0	0	0	0	0	110	0,113	0,136	0,029	0,029	0,032	0,122
3-й год							*6-й год*						
0	0,584	0,684	0,623	0,625	0,568	0,546	0	0,148	0,139	-	0,111	-	0,157
10	1,213	1,287	1,203	1,217	1,128	1,067	10	0,379	0,356	-	0,280	-	0,345
20	2,336	2,278	2,179	2,189	2,104	1,954	20	0,940	0,878	-	0,687	-	0,735
30	3,908	3,613	3,513	3,421	3,494	3,173	30	2,163	1,982	-	1,584	-	1,463
40	5,186	4,830	4,709	4,309	4,801	4,261	40	4,191	3,666	-	3,170	-	2,558
50	5,089	5,156	4,949	4.151	5,109	4,447	50	5,892	4,766	-	4,819	-	3,582
60	3,713	4,331	4,029	3,086	4,146	3,571	60	5,350	3,961	-	4,891	-	3,700
70	2,173	2,969	2,659	1,887	2,693	2,317	70	3,253	2,254	-	3,296	-	2,793
80	1,115	1,767	1,524	1,021	1,510	1,306	80	1,536	1,025	-	1,670	-	1,656
90	0,534	0,966	0,804	0,517	0,778	0,679	90	0,641	0,420	-	0,729	-	0,848
100	0,247	0,503	0,406	0,253	0,384	0,338	100	0,254	0,164	-	0,298	-	0,403
110	0,113	0,256	0,201	0,122	0,185	0,165	110	0,098	0,063	-	0,118	-	0,184
120	0,584	0,684	0,623	0,625	0,568	0,546							
130	1,213	1,287	1,203	1,217	1,128	1,067							

В 3-й год погодные условия не отличались от среднемноголетних, поэтому кривые прироста имеют выровненный характер.

В 4-м году пики куполов несколько смещены по оси абсцисс. Объясняется это тем, что для развития семян необходимо определенное количество влаги (40-50 % от сухого вещества) и тепла [57]. На расстоянии 2,5Н от ЛП семена за счет лучших условий под влиянием ЗЛН раньше получили необходимое количество воды и питательных веществ, чем на расстоянии 20Н от ЛП. Снивелировали ЛП и условия роста на межполосном пространстве. Весь период τ развития на расстоянии 2,5Н от ЛП прошел быстрее, чем на расстоянии 20Н от ЛП.

В 5-й год погодные условия характеризуются как средние, но в мае-июне выпало всего 23 мм осадков. Поэтому прирост на контроле на начальном этапе развития стебля τ = 0,2 составил 0,5 см/сут, а на расстоянии 2,5Н от ЛП на тот же период – 1 см/сут. Орошение и выпавшие осадки сравняли условия роста, но за счет положительного влияния ЛП максимальный прирост стебля на расстоянии 2,5Н от ЛП составил 5,2 см/сут при τ = 0,46, а на контроле – 4 см/сут при τ = 0,6.

Шестой год влажный, но условия, складывающиеся под защитой ЛП, более благоприятные, чем на открытом поле, поэтому наименьшие суточные приросты по высоте стеблей на контроле.

Итак, ЛП положительно влияют на развитие всех гибридов кукурузы: ВИР-156 ТВ, Днепровский 98 МВ, VC-183, Элора. Их развитие описывается логистической функцией в разных погодных условиях с высокой точностью аппроксимации, что дает возможность давать прогнозы развития данного растительного вида.

Построив модель (см. табл. 6), выяснили также, что все гибриды 1-й (позднеспелые) и 2-й (среднеспелые) групп спелости на разном расстоянии от ЛП подчиняются одной закономерности – логистической. Для дальнейшего анализа данные по максимальной высоте кукурузы за 6 лет были сведены в корреляционную решетку и нормированы. Математическая обработка полученных данных позволила описать максимальную высоту кукурузы единой экспоненциальной функцией (13).

Для удобства расчета высоты кукурузы по абсолютным данным уравнение примет вид:

$$H_{\Delta} = H_K + a \cdot e^{-bL_H}, \qquad (29)$$

где L_H – расстояние до ЛП; H_K – высота кукурузы на контроле.

Параметры зависимости были рассчитаны в программе Statistica 6.0. В результате расчетов была получена формула:

$$H_{\Delta} = 201 + 55{,}25 \cdot e^{-0{,}07L_H}, \qquad (30)$$

где 201 – средняя многолетняя H_{max} на контроле.

График зависимости общего вида показан на рис. 8. На нем расположены экспериментальные точки и аппроксимированная экспоненциаль-

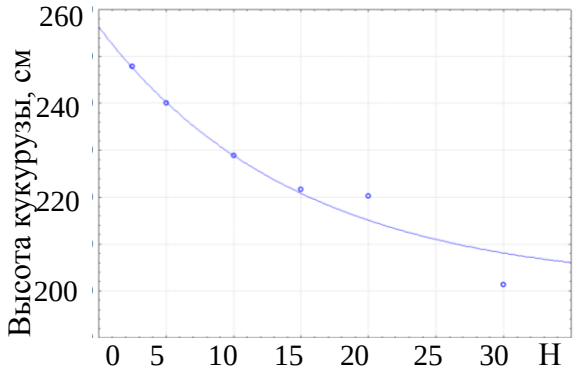

Рис. 8. График зависимости максимальной высоты кукурузы от расстояния до ЛП (Н) за период вегетации

ная зависимость максимальной высоты кукурузы.

Коэффициент корреляции R_{xy} = –0,98 очень высок. Ошибка коэффициента корреляции S_r = 0,11. Коэффициент детерминации R^2 = 96,4 % указывает на сильную связь между высотой стеблей кукурузы и расстоянием до ЛП. Коэффициенты уравнения и параметры *a* и *b* справедливы для нормированных данных.

В результате математического расчета были получены данные по максимальной высоте стебля на разном расстоянии от ЛП (табл. 7).

Таблица 7

Сравнение фактической $H_ф$ и расчетной $H_р$ максимальной высоты кукурузы на разном расстоянии от ЛП

Расстояние от ЛП, Н	В приведенных единицах, H/H_{max}			В абсолютных единицах, см		
	$H_ф$	$H_р$	ε, %	$H_ф$	$H_р$	ε, %
2,5	0,97	0,98	1,0	248	249	0,4
5	0,97	0,95	2,0	240	241	0,4
10	0,89	0,90	1,1	229	230	0,4
15	0,87	0,87	0	222	222	0
20	0,85	0,85	0	220	216	1,8
Контроль	0,79	0,82	3,8	201	208	3,5

Относительная ошибка ε расчетных данных к фактическим не превышает 4 %, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации данного уравнения. Поскольку уравнение (29) было получено в результате осреднения многолетних данных по высоте кукурузы, его работа в качестве уравнения прогноза была проверена для конкретных условий каждого года (табл. 8).

Таблица 8

Фактические $H_ф$ и расчетные $H_р$ данные по высоте стеблей кукурузы на разных расстояниях от ЛП согласно уравнению (30)

Показатель	Расстояние до ЛП, Н					Контроль	Показатель	Расстояние до ЛП, Н					Контроль
	2,5	5	10	15	20			2,5	5	10	15	20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1-й год							*4-й год*						
$H_ф$	209	203	191	180	174	160	$H_ф$	316	310	280	291	284	-
$H_р$	206	199	187	179	174	167	$H_р$	330	323	311	303	298	-
ε	1,3	2,0	1,9	0,4	0,2	–4,2	ε	–4,6	–4,2	–11,2	–4,2	–4,8	-

Продолжение табл. 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2-й год							*5-й год*						
$H_ф$	210	223	199	195	167	144	$H_ф$	234	210	198	211	200	183
$H_р$	190	183	171	163	158	151	$H_р$	239	222	210	202	197	190
ε	9,3	18,0	13,9	16,2	5,6	–4,7	ε	2,0	–5,7	–6,3	4,1	1,7	–3,7
3-й год							*6-й год*						
$H_ф$	268	296	276	235	276	245	$H_ф$	250	198	-	218	-	184
$H_р$	291	284	272	264	259	252	$H_р$	230	223	-	203	-	191
ε	–8,7	4,1	1,3	–12,5	6,3	–2,8	ε	7,8	–12,6	-	6,7	-	–3,7

Относительная ошибка расчетных данных не превышает 18 %. Поэтому данное уравнение может быть предложено в качестве модели прогноза роста сельхозкультур в системе ЛП при орошении, даже с учетом разных климатических условий каждого года.

4.2. Динамика биомассы сельскохозяйственных культур

Биомасса растений является интегральной характеристикой продукционного процесса, тесно связанного с площадью листьев и надземной фитомассой, которые позволяют прогнозировать величину ассимилирующей поверхности растения, а следовательно, конечного урожая.

На основании 30-летних исследований по проблеме биопродуктивности продукционного процесса и обобщения данных других исследователей в орошаемых агролесоландшафтах была получена модель динамики биопродуктивности агроценозов [58].

Полевые исследования, лежащие в основе математической модели биопродуктивности биомассы, были проведены на кукурузе, отличающейся биологическим временем развития (позднеспелые и среднеспелые) и гибридными формами и условиями произрастания. Период вегетации позднеспелых гибридов приравнивался к 130 дням (τ = 130), среднеспелых – к 110 (τ = 110).

Для аналитического описания зависимости биомассы кукурузы от времени развития и расстояния от ЛП (Н) использовалась общая методика, расписанная в гл. 3.2, согласно формулам (14)-(17). Данные по биомассе *M*, отобранные в поле по фазам вегетации (табл. 9), на предварительном этапе были нормированы, приведены и выражены в относительных единицах, где продолжительность вегетации τ_{max} и максимальная биомасса M_{max} равны 1,0.

Биомасса кукурузы была описана логистической функцией в разных погодных условиях (рис. 9, 10). Графики имеют вид S-образных кривых, где параметры зависимостей в соответствии с формулами (16), (17) даны для сухой и сырой биомасс (табл. 10).

Таблица 9

Динамика прироста сырой/сухой надземной биомассы (г) кукурузы под влиянием ЛП

День вегетации, τ	Расстояние от ЛП, Н					Контроль
	2,5	5	10	15	20	
1-й год (ВИР-156 ТВ, срок вегетации 130-150 дней)						
10	9,2/1,4	12/1,4	12,1/1,5	12,8/1,7	7,2/0,9	6,1/0,9
21	59,9/9,4	84,2/19,1	84,2/19,1	90,8/19,9	58,0/11,2	81/21,2
45	507,3/101,4	421,3/108,3	421,3/108,3	386,7/82,7	435/118,1	281,7/56,8
88	1487/465	957,5/320	1270/437	1180/347,5	835/272,5	535/167,5
2-й год (VC-183, срок вегетации 130-150 дней)						
30	94,5/9,8	123,6/14,9	82,1/9,1	81/10,2	100,4/13,4	84,8/9,3
41	292,9/29,2	342,1/47,6	343,8/49	322,3/41,9	261/30,3	168,8/27,1
67	747/175	965/192,5	737/172	732,5/148	635,8/148,8	550/120
3-й год (Днепровский 98 МВ, срок вегетации 100-115 дней)						
33	1,48/0,3	1,66/0,3	1,48/0,35	1,66/0,39	1,59/0,32	-
47	21/2,8	34,9/4,4	27,4/3,6	36/4,7	28,2/3,5	-
69	598,3/-	856,7/-	-	655/-	666,7/-	-
90	1257/194,3	1169,3/153,7	-	1037,1/114,5	993,3/134,8	-
4-й год (гибрид Элора, срок вегетации 110-115 дней)						
65	500/62,4	501/65,8	764/88,4	720/101,8	695,6/99	257,4/37,3
95	919/249	652/182,6	796,5/149,2	1090/324,5	937,8/299,4	383,8/121
5-й год (гибрид Элора, срок вегетации 110-115 дней)						
23	2,6/0,5	1,34/0,25	-	1,29/0,3	-	1,35/0,26
58	458,8/51,5	487,2/46,5	-	347,2/38,5	-	254,2/27,1
100	629/194,1	514,0/159,3	-	656/205,2	-	380/117,8

На 1-м и 2-м годах ускорение в нарастании биомассы происходит при τ = 0,2-0,6 (рис. 9а, б), на 3-м при τ = 0,5-0,9 (рис. 9в), на 4-м при τ = 0,3-1,0 (рис. 9г), на пятом году при τ = 0,4-0,9 (рис. 9д). Это обусловлено реакцией гибридов и сорта (четвертый год) кукурузы на минеральное почвенное питание, особенностями светового дня и длиной вегетационного периода растений. Изгиб в кривой соответствует началу быстрого роста, т. е. увеличению площади листовых пластинок и общему нарастанию биомассы. Выход на плато соответствует окончанию роста и созреванию початков. Биологическая сущность этого процесса объясняется окончанием формирования зачаточного початка [56], в растении накапливается необходимое количество ассимилятов для формирования репродуктивных органов.

Полученные уравнения логистической функции позволяют создавать прогнозные модели для всех сельхозкультур в богарных (при оптимальных условиях) и орошаемых агролесоландшафтах. При нарушении технологической карты поля и внесении большего количества удобрений или несоблюдении режима орошения ошибка регрессии увеличивается.

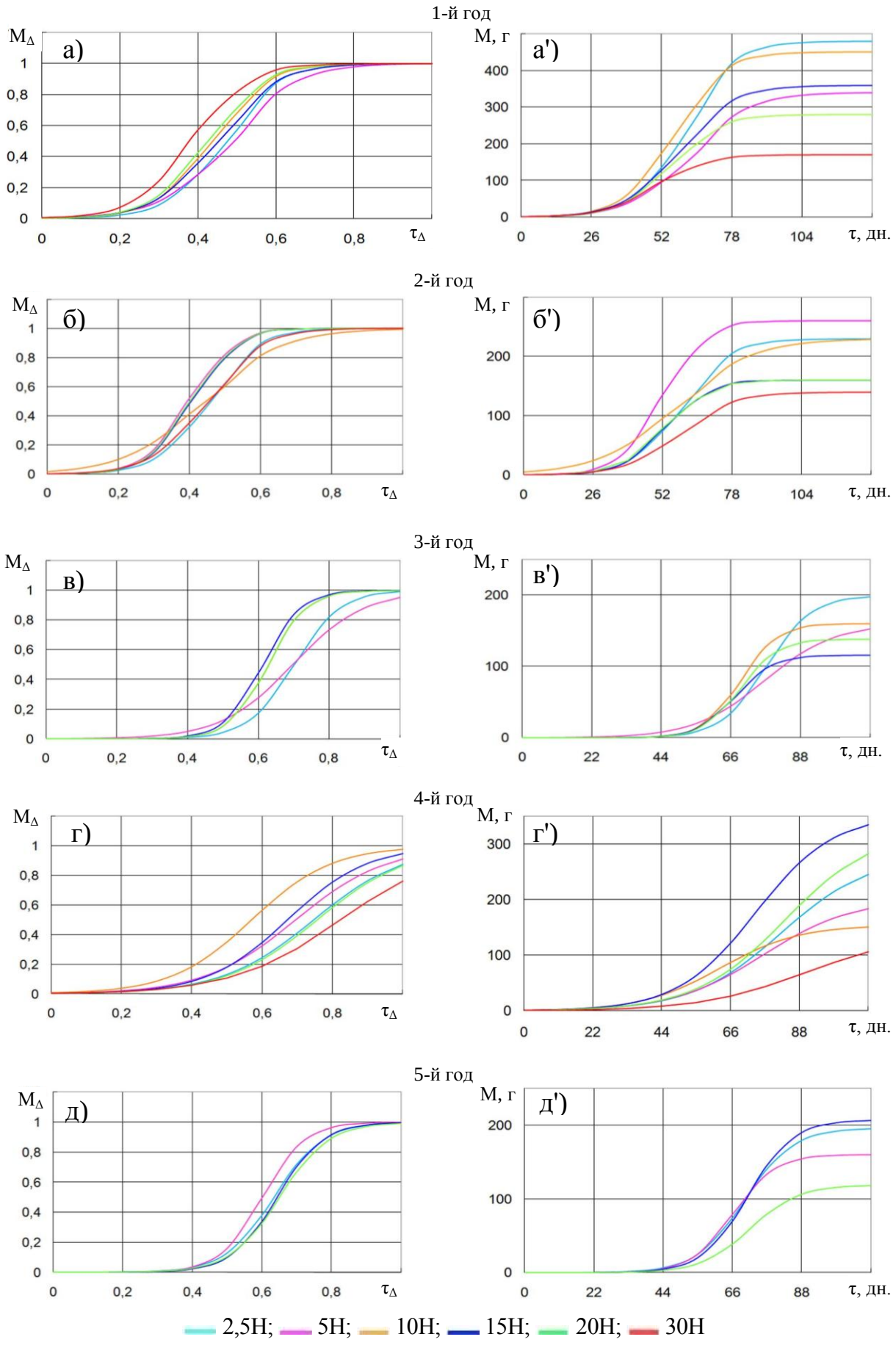

Рис. 9. Динамика надземной сухой биомассы кукурузы на разном расстоянии от ЛП (а, б, в, г, д – в нормированных единицах; а′, б′, в′, г′, д′ – в натуральных величинах)

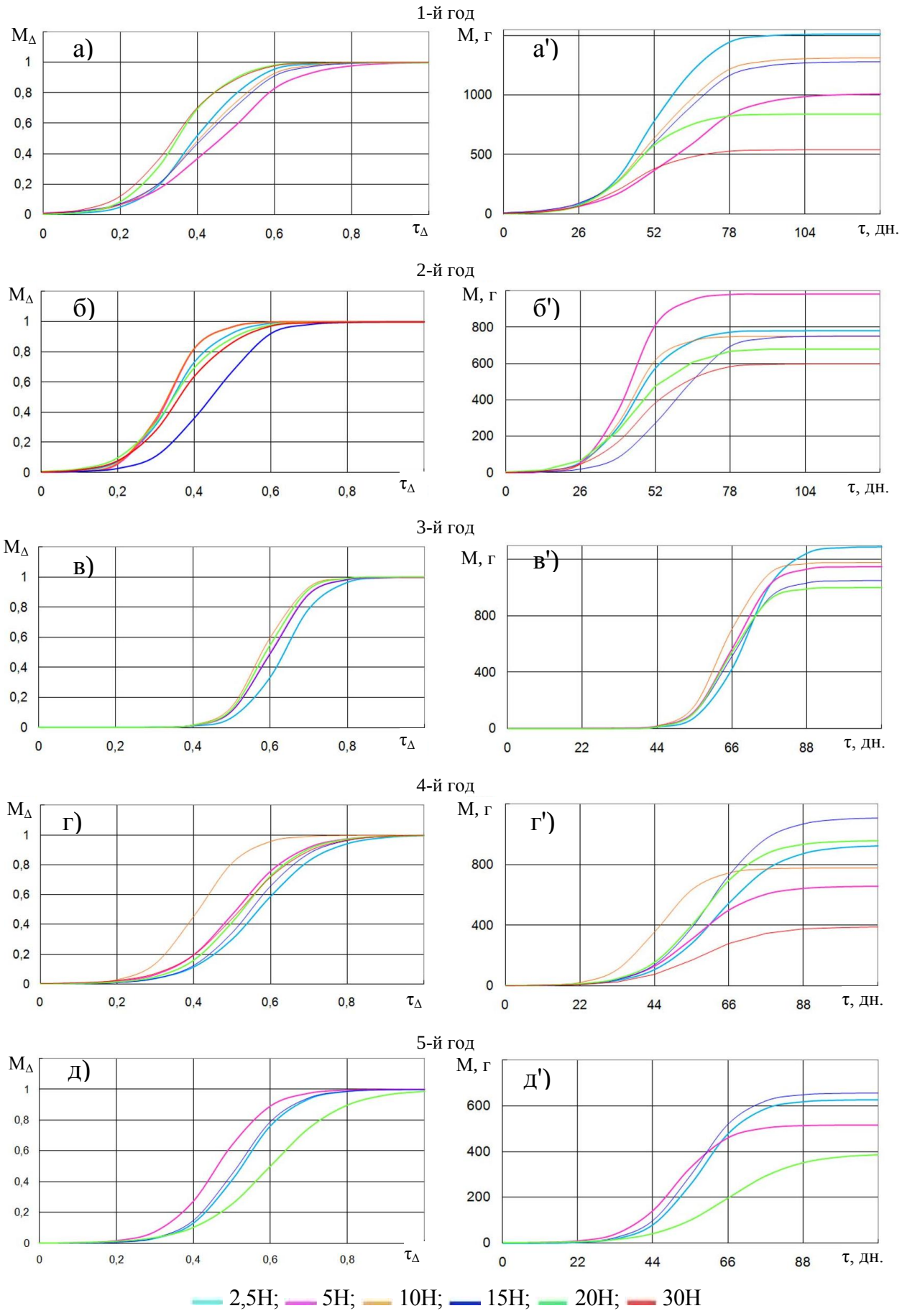

Рис. 10. Динамика надземной сырой биомассы кукурузы на разном расстоянии от ЛП (а, б, в, г, д – в нормированных единицах; а´, б´, в´, г´, д´ – в натуральных величинах)

Таблица 10

Параметры *a* и *b* логистической функции по годам для надземной биомассы кукурузы и ошибка уравнения регрессии M_{xy}

Расстояние от ЛП, Н	Сухая биомасса кукурузы			Сырая биомасса кукурузы		
	параметры уравнения		M_{xy}	параметры уравнения		M_{xy}
	a	*b*		*a*	*b*	
1-й год						
2,5	6,65	–0,11	7,22	5,94	–0,12	17,36
5	5,62	–0,09	11,02	4,77	–0,08	30,22
10	6,18	–0,11	7,02	5,25	–0,10	22,47
15	5,79	–0,10	8,96	5,03	–0,09	26,08
20	6,03	–0,11	27,32	5,55	–0,12	20,53
Контроль	5,44	–0,11	11,60	4,83	–0,11	29,49
2-й год						
2,5	6,46	–0,11	0,11	6,09	–0,14	3,01
5	6,68	–0,13	3,28	7,21	–0,17	54,13
10	3,99	–0,07	15,40	6,94	–0,16	10,43
15	6,83	–0,13	2,08	6,70	–0,12	2,73
20	6,78	–0,13	9,75	5,30	–0,12	2,73
Контроль	5,81	–0,10	0,09	5,45	–0,12	23,27
3-й год						
2,5	10,81	–0,14	14,52	12,73	–0,18	3,43
5	6,90	–0,09	13,67	12,59	–0,19	23,23
10	11,73	–0,17	0,06	12,99	–0,20	5,70
15	11,45	–0,17	0,17	12,43	–0,19	6,12
Контроль	11,73	–0,17	0,02	13,01	–0,20	12,63
4-й год						
2,5	5,75	–0,07	23,90	6,86	–0,11	18,96
5	5,35	–0,07	11,98	6,53	–0,12	14,44
10	5,02	–0,08	3,30	6,78	–0,15	5,52
15	5,92	–0,08	22,14	7,10	–0,12	21,04
20	5,83	–0,07	19,41	6,93	–0,12	29,25
Контроль	5,43	–0,06	0,05	6,12	–0,11	13,21
5-й год						
2,5	9,08	–0,13	3,00	8,05	–0,14	97,93
5	9,93	–0,15	3,35	7,16	–0,14	79,75
15	9,92	–0,14	1,36	7,88	–0,14	12,28
Контроль	9,31	–0,13	0,48	6,50	–0,10	76,31

Заслуживает внимания анализ суточных приростов сухого вещества, так как формирование ассимилирующей поверхности и конечный урожай напрямую зависят от приростов биомассы растений.

Высокий урожай может быть получен при стабильных суточных приростах сухого вещества [59], процедура нахождения которых очень трудоемка и требует большой затраты времени. Ранее суточные приросты

сухого вещества растений рассчитывались как произведение чистой продуктивности фотосинтеза на площадь листьев в данный момент времени и определялись через взятие образцов в поле. Используя математическое моделирование, мы написали свою методику их вычисления (см. в гл. 3.2) по формуле (18); суточные приросты сухой и соответственно сырой биомассы есть первая производная логистической функции [60]. На способ расчета биомассы растений в межполосном пространстве был получен патент на изобретение № 2603903 (приложение В). Графики скорости роста биомассы (сырой и сухой) в течение вегетации представлены на рис. 11, 12. Были получены декадные данные по приросту биомассы одного растения и рассчитаны по плотности посадки на площадь прироста биомассы растений с 1 га (табл. 11, 12). При необходимости можно получить приближенное значение скорости роста за любой день.

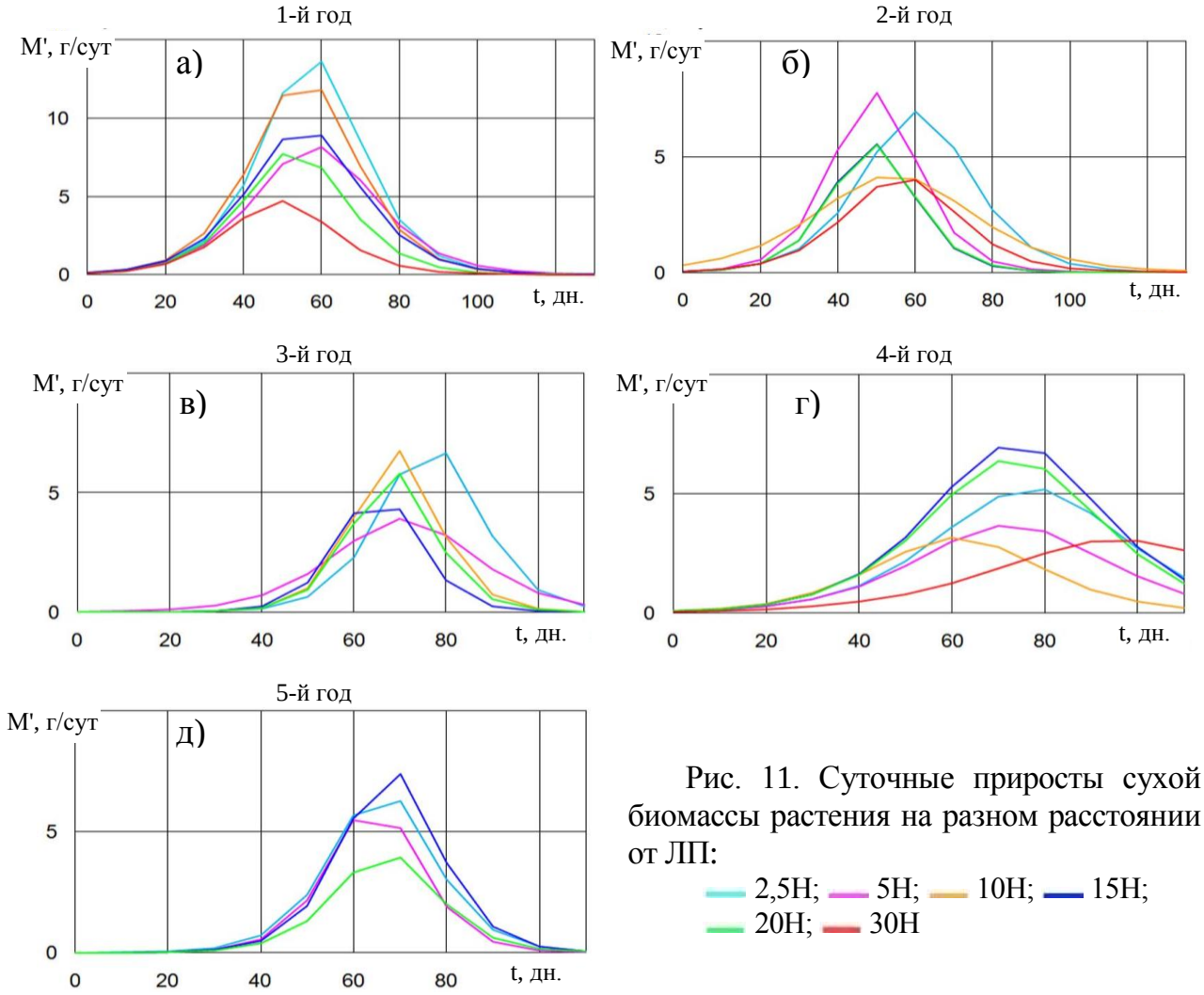

Рис. 11. Суточные приросты сухой биомассы растения на разном расстоянии от ЛП:
2,5Н; 5Н; 10Н; 15Н; 20Н; 30Н

В 1-й год наибольший прирост сухой биомассы наблюдается под защитой ЛП на расстоянии от 2,5 до 15Н при $\tau = 60$. На расстоянии 2,5Н от ЛП он достигает 816 кг/га за сутки (около 13 г на одно растение). На контроле максимальный прирост сухой биомассы составляет 281 кг/га

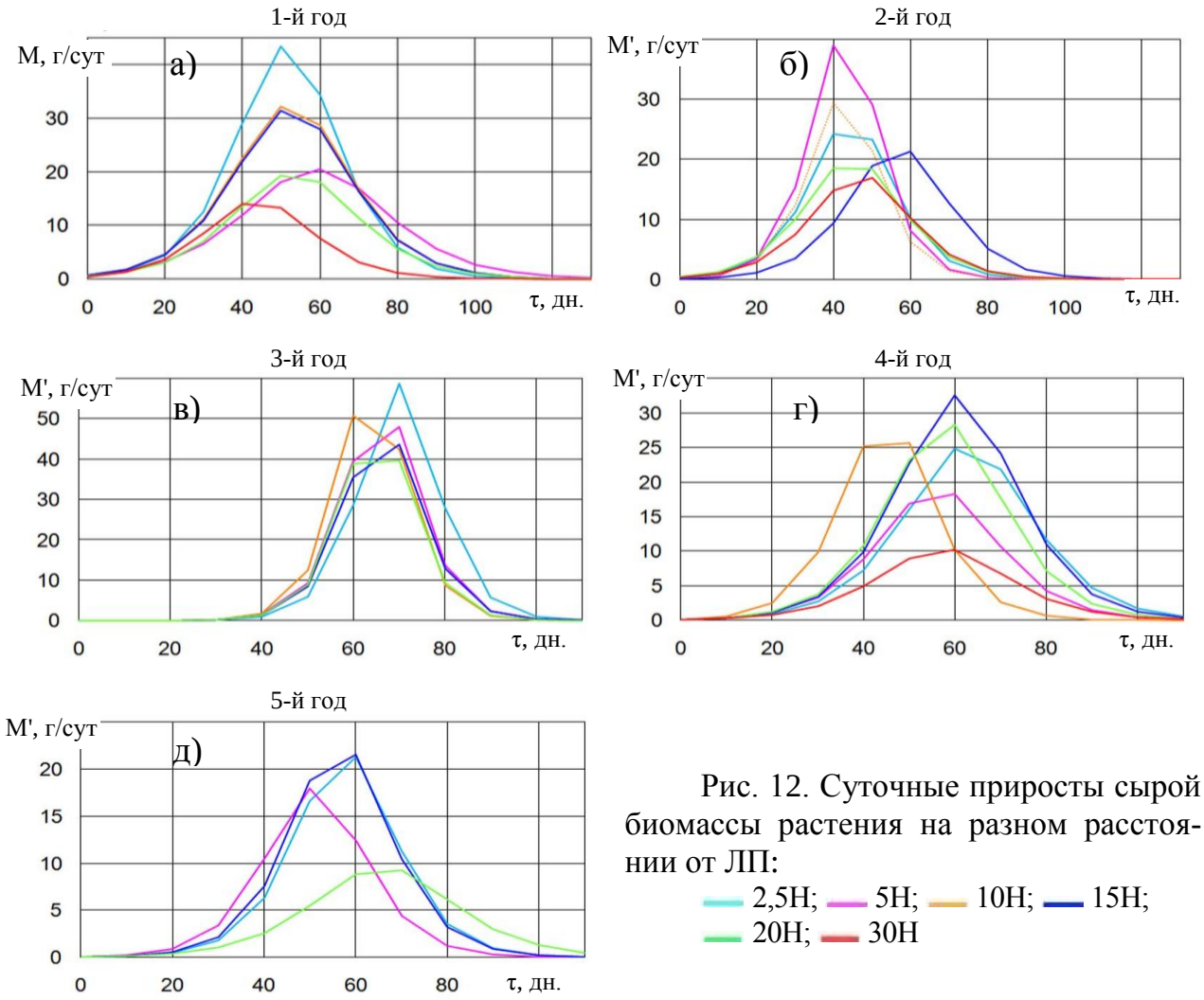

Рис. 12. Суточные приросты сырой биомассы растения на разном расстоянии от ЛП:
2,5H; 5H; 10H; 15H; 20H; 30H

(7 г на 1 растение) при τ = 50. Причем, если на расстоянии 2,5-15H от ЛП идет интенсивное нарастание сухого вещества, то на расстоянии 30H уже с 20-го дня прибавка заметно уступает (на 20-30 %) вариантам под защитой ЛП (см. рис. 11).

Во 2-м году наибольший суточный прирост на расстоянии 5H от ЛП составил 466 кг/га сухого вещества (8 г на 1 растение). На расстоянии 2,5H он был несколько ниже – 418 кг/га (7 г на 1 растение) и на декаду позже (τ = 60). Наименьший прирост сухой биомассы на расстоянии 30H составил 223 кг/га (4 г на 1 растение) и пришелся на 5-ю декаду вегетации.

Третий год характеризуется повышенной влажностью. Наибольший прирост сухой биомассы отмечен на расстоянии 10H от ЛП при τ = 70 и составил 473 кг/га, или 7 г на растение. На расстоянии 2,5H от ЛП прирост также высок – 466 кг/га. Особой разницы в приросте биомассы на контроле (20H) – 405 кг/га – не отмечено. Мы объясняем это большей влажностью почвы под посевом, так как именно на расстоянии 10H от ЛП самый высокий прирост биомассы при τ = 70. Но при всех отрицательных факторах надо отметить, что на протяжении всей вегетации влияние ЛП более благоприятно сказывается на биомассе кукурузы, так как на расстоянии 2,5-5H от ЛП прирост сухого вещества выше по абсолютным значениям.

Таблица 11

Динамика прироста сухой надземной биомассы кукурузы по годам

День вегетации, τ	Расстояние от ЛП, Н											
	2,5		5		10		15		20		30	
	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1-й год												
0	0,071	4,260	0,117	7,000	0,103	6,180	0,113	6,780	0,075	4,500	0,080	4,800
10	0,225	13,500	0,304	18,200	0,311	18,700	0,318	19,100	0,234	17,000	0,238	14,280
20	0,706	42,400	0,778	46,700	0,926	55,600	0,876	52,600	0,706	42,400	0,682	40,900
30	2,127	127,600	1,893	113,600	2,618	157,100	2,282	136,900	2,004	120,200	1,779	106,700
40	5,731	343,860	4,115	246,900	6,441	386,500	5,169	310,100	4,778	286,700	3,644	218,600
50	11,586	695,200	7,049	422,900	11,441	686,400	8,641	518,500	7,710	462,600	4,688	281,300
60	13,603	816,200	8,158	489,500	11,771	706,300	8,901	534,100	6,846	410,800	3,373	202,400
70	8,552	513,100	6,035	362,100	6,919	415,100	5,577	334,600	3,548	212,900	1,572	94,300
80	3,551	213,100	3,177	190,600	2,873	172,400	2,523	151,400	1,366	81,960	0,591	35,500
90	1,228	73,700	1,388	83,300	1,024	61,400	0,978	58,700	0,466	27,960	0,204	12,200
100	0,398	23,900	0,558	33,500	0,345	20,700	0,357	21,400	0,152	9,120	0,068	4,080
110	0,126	7,560	0,216	12,960	0,114	6,840	0,127	7,600	0,049	2,940	0,022	1,320
120	0,039	2,340	0,083	4,980	0,037	2,200	0,045	2,700	0,015	0,900	0,007	0,420
130	0,012	0,720	0,031	1,860	0,012	0,720	0,015	0,900	0,005	0,300	0,002	0,120
2-й год												
0	0,044	2,600	0,039	2,300	0,298	17,900	0,024	1,400	0,025	1,500	0,049	2,900
10	0,127	7,600	0,148	8,900	0,598	35,900	0,097	5,800	0,099	5,900	0,136	8,100
20	0,363	21,800	0,558	33,500	1,150	69,000	0,381	22,800	0,385	23,100	0,369	22,200
30	1,007	60,400	1,946	116,800	2,054	123,300	1,390	83,400	1,383	82,900	0,956	57,400
40	2,557	153,500	5,292	317,500	3,213	192,800	3,888	233,800	3,829	229,700	2,172	130,300
50	5,215	312,900	7,764	465,800	4,100	246,000	5,558	333,500	5,508	330,500	3,712	222,700

Продолжение табл. 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
60	6,960	417,600	4,864	291,900	4,050	243,000	3,223	193,400	3,269	196,100	3,987	239,200
70	5,370	322,200	1,717	103,000	3,106	186,400	1,056	63,400	1,096	65,700	2,611	156,600
80	2,681	160,900	0,486	29,100	1,956	117,400	0,282	16,900	0,298	17,900	1,220	73,200
90	1,064	63,900	0,129	7,700	1,086	65,100	0,071	4,260	0,076	4,600	0,483	28,900
100	0,385	23,100	0,033	2,000	0,561	33,700	0,018	1,060	0,019	1,150	0,179	10,700
110	0,134	8,100	0,009	0,500	0,280	16,800	0,004	0,260	0,005	0,290	0,065	3,880
120	0,046	2,800	0,002	0,100	0,137	8,200	0,001	0,070	0,001	0,070	0,023	1,390
130	0,016	0,900	0,001	0,040	0,066	3,980	0	0,020	0	0,020	0,008	0,490
3-й год												
0	0,001	0,034	0,016	0,938	0	0,013	0	0,013	0	0,011	-	-
10	0,002	0,140	0,041	2,480	0,001	0,071	0,001	0,075	0,001	0,063	-	-
20	0,010	0,577	0,109	6,524	0,007	0,391	0,007	0,433	0,006	0,353	-	-
30	0,039	2,364	0,282	16,918	0,036	2,136	0,042	2,494	0,033	1,964	-	-
40	0,160	9,630	0,705	42,287	0,193	11,556	0,236	14,143	0,180	10,811	-	-
50	0,637	38,197	1,608	96,506	0,990	59,408	1,222	73,346	0,937	56,246	-	-
60	2,277	136,648	3,000	180,000	3,964	237,859	4,139	248,349	3,698	221,888	-	-
70	5,758	345,477	3,899	233,927	6,754	405,269	4,305	258,276	5,804	348,263	-	-
80	6,653	399,194	3,205	192,310	3,161	189,667	1,327	79,634	2,474	148,468	-	-
90	3,185	191,078	1,795	107,708	0,729	43,715	0,259	15,517	0,545	32,680	-	-
100	0,953	57,152	0,804	48,222	0,139	8,358	0,046	2,741	0,102	6,097	-	-
110	0,245	14,675	0,324	19,469	0,026	1,540	0,008	0,476	0,018	1,102	-	-
4-й год												
0	0,066	3,957	0,070	4,179	0,082	4,907	0,075	4,509	0,075	4,516	0,053	3,188
10	0,138	8,293	0,144	8,646	0,183	10,981	0,167	9,993	0,166	9,943	0,093	5,579
20	0,287	17,249	0,295	17,690	0,401	24,076	0,366	21,971	0,362	21,703	0,162	9,717
30	0,588	35,309	0,590	35,389	0,841	50,473	0,791	47,471	0,775	46,504	0,280	16,778
40	1,166	69,966	1,128	67,698	1,607	96,434	1,647	98,795	1,596	95,785	0,476	28,539

Окончание табл. 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	2,168	130,060	1,983	118,979	2,581	154,866	3,172	190,330	3,034	182,024	0,789	47,330
60	3,584	215,027	3,010	180,581	3,158	189,463	5,280	316,803	4,960	297,611	1,255	75,277
70	4,899	293,920	3,671	220,269	2,783	166,953	6,929	415,738	6,377	382,644	1,868	112,061
80	5,185	311,105	3,441	206,431	1,831	109,882	6,692	401,531	6,050	363,008	2,522	151,291
90	4,191	251,451	2,516	150,973	0,990	59,401	4,804	288,214	4,297	257,821	2,987	179,208
100	2,716	162,982	1,530	91,828	0,480	28,802	2,774	166,453	2,474	148,456	3,033	181,971
110	1,522	91,305	0,830	49,829	0,221	13,238	1,409	84,546	1,259	75,552	2,634	158,035
5-й год												
0	0,003	0,180	0,001	0,070	-	-	0,001	0,090	-	-	0,001	0,090
10	0,012	0,720	0,006	0,330	-	-	0,006	0,380	-	-	0,006	0,360
20	0,048	2,850	0,026	1,560	-	-	0,028	1,660	-	-	0,024	1,450
30	0,186	11,160	0,120	7,220	-	-	0,119	7,120	-	-	0,096	5,760
40	0,706	42,380	0,543	32,560	-	-	0,500	30,000	-	-	0,372	22,350
50	2,397	143,820	2,163	129,810	-	-	1,939	116,360	-	-	1,308	78,490
60	5,683	340,960	5,492	329,490	-	-	5,557	333,390	-	-	3,305	198,270
70	6,273	376,350	5,166	309,970	-	-	7,384	443,030	-	-	3,956	237,380
80	3,021	181,260	1,888	113,270	-	-	3,728	223,660	-	-	1,992	119,550
90	0,935	56,090	0,463	27,770	-	-	1,090	65,370	-	-	0,619	37,160
100	0,250	14,980	0,102	6,130	-	-	0,267	16,030	-	-	0,164	9,810
110	0,064	3,840	0,022	1,320	-	-	0,063	3,760	-	-	0,041	2,480

Примечание. Здесь и в табл. 12 M' – суточные приросты одного растения, $M_{га}'$ – суточные приросты биомассы в пересчете на 1 га.

Таблица 12

Динамика прироста сырой надземной биомассы кукурузы по годам

День вегета-ции, τ	Расстояние от ЛП, Н											
	2,5		5		10		15		20		30	
	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут	M', г/сут	$M_{га}'$, кг/га сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1-й год												
0	0,456	27,000	0,740	44,000	0,676	41,000	0,745	45,000	0,395	24,000	0,465	28,000
10	1,435	86,000	1,745	105,000	1,803	108,000	1,871	112,000	1,322	79,000	1,346	81,000
20	4,404	264,000	3,983	239,000	4,668	280,000	4,555	273,000	4,237	254,000	3,674	220,000
30	12,550	753,000	8,455	507,000	11,202	672,000	10,303	618,000	11,856	711,000	8,560	514,000
40	29,164	1750,000	15,422	925,000	22,511	1351,000	19,804	11888,000	23,199	1392,000	14,046	843,000
50	43,406	2604,000	21,514	1291,000	32,143	1929,000	28,149	1689,000	23,726	1424,000	13,344	801,000
60	34,351	2061,000	20,838	1250,000	28,636	1718,000	26,378	1583,000	12,526	752,000	7,518	451,000
70	16,237	974,000	14,160	850,000	16,672	1000,000	16,689	1001,000	4,540	272,000	3,104	186,000
80	5,917	355,000	7,513	451,000	7,495	450,000	8,163	490,000	1,424	85,000	1,120	67,000
90	1,953	117,000	3,482	209,000	2,987	179,000	3,506	210,000	0,426	26,000	0,384	23,000
100	0,623	37,000	1,514	91,000	1,134	68,000	1,422	85,000	0,125	8,000	0,130	8,000
110	0,197	12,000	0,640	38,000	0,422	25,000	0,564	34,000	0,037	2,000	0,043	3,000
120	0,062	4,000	0,267	16,000	0,156	9,000	0,221	13,000	0,010	0,600	0,014	0,800
130	0,019	1,000	0,111	7,000	0,057	3,000	0,086	5,000	0,003	0,180	0,004	0,200
2-й год												
0	0,240	14,373	0,122	7,333	0,118	7,071	0,108	6,502	0,396	23,781	0,297	17,806
10	0,928	55,659	0,653	39,209	0,600	35,972	0,351	21,051	1,262	75,710	0,929	55,749
20	3,460	207,590	3,397	203,845	2,953	177,199	1,122	67,313	3,827	229,616	2,796	167,745
30	11,257	675,392	15,327	919,635	12,472	748,301	3,449	206,969	10,053	603,165	7,481	448,882
40	24,208	1452,481	39,002	2340,090	29,418	1765,075	9,424	565,421	18,470	1108,200	14,837	890,222
50	23,306	1398,376	29,199	1751,937	21,481	1288,838	18,925	1135,501	18,359	1101,514	16,875	1012,493

Продолжение табл. 12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
60	10,297	617,831	8,212	492,713	6,266	375,935	21,355	1281,321	9,903	594,209	10,308	618,488
70	3,105	186,326	1,665	99,921	1,335	80,129	12,710	762,592	3,755	225,294	4,212	252,729
80	0,828	49,688	0,315	18,879	0,265	15,907	5,046	302,774	1,236	74,179	1,446	86,764
90	0,214	12,813	0,059	3,519	0,052	3,113	1,689	101,352	0,388	23,289	0,467	28,010
100	0,055	3,275	0,011	0,654	0,010	0,607	0,533	31,991	0,120	7,202	0,148	8,863
110	0,014	0,835	0,002	0,122	0,002	0,118	0,165	9,910	0,037	2,217	0,046	2,786
120	0,004	0,213	0	0,023	0	0,023	0,051	3,052	0,011	0,681	0,015	0,874
130	0,001	0,054	0	0,004	0	0,005	0,016	0,938	0,003	0,209	0,005	0,274
3-й год												
0	0,001	0,042	0,001	0,045	0,001	0,033	0,001	0,047	0	0,027	-	-
10	0,004	0,259	0,005	0,300	0,004	0,248	0,005	0,308	0,003	0,199	-	-
20	0,027	1,600	0,034	2,013	0,031	1,889	0,033	2,008	0,024	1,467	-	-
30	0,165	9,876	0,225	13,473	0,239	14,347	0,218	13,085	0,180	10,789	-	-
40	1,010	60,576	1,488	89,297	1,795	107,706	1,406	84,370	1,310	78,580	-	-
50	5,968	358,053	9,244	554,635	12,387	743,223	8,490	509,417	8,886	533,131	-	-
60	28,616	1716,948	39,536	2372,187	50,823	3049,359	35,496	2129,780	38,903	2334,168	-	-
70	58,720	3523,209	47,990	2879,425	42,386	2543,152	43,670	2620,204	39,675	2380,513	-	-
80	27,722	1663,308	13,665	819,898	8,699	521,959	12,940	776,370	9,235	554,080	-	-
90	5,724	343,411	2,291	137,474	1,223	73,353	2,243	134,569	1,366	81,952	-	-
100	0,966	57,990	0,348	20,874	0,162	9,730	0,350	21,024	0,188	11,258	-	-
110	0,158	9,452	0,052	3,121	0,021	1,281	0,054	3,231	0,026	1,531	-	-
4-й год												
0	0,107	6,405	0,111	6,678	0,133	7,970	0,107	6,428	0,113	6,752	0,091	5,467
10	0,317	19,009	0,354	21,252	0,591	35,471	0,345	20,724	0,371	22,250	0,263	15,757
20	0,933	55,954	1,112	66,697	2,561	153,637	1,105	66,278	1,209	72,561	0,745	44,712
30	2,680	160,799	3,341	200,436	9,883	593,005	3,442	206,521	3,813	228,805	2,023	121,373
40	7,193	431,606	8,836	530,187	25,257	1515,399	9,901	594,046	10,834	650,065	4,880	292,788

Окончание табл. 12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	16,156	969,379	16,951	1017,089	25,686	1541,154	22,811	1368,646	23,194	1391,663	8,953	537,172
60	24,812	1488,725	18,266	1095,962	10,267	616,003	32,564	1953,844	28,265	1695,896	10,199	611,922
70	21,821	1309,247	10,638	638,300	2,678	160,683	24,200	1451,988	17,660	1059,591	6,806	408,361
80	11,663	699,793	4,233	254,002	0,619	37,160	10,860	651,596	7,087	425,211	3,130	187,819
90	4,705	282,282	1,435	86,101	0,139	8,352	3,825	229,517	2,353	141,167	1,203	72,166
100	1,686	101,159	0,460	27,602	0,031	1,865	1,233	73,983	0,732	43,919	0,430	25,828
110	0,579	34,718	0,145	8,690	0,007	0,416	0,386	23,166	0,223	13,387	0,150	9,009
5-й год												
0	0,028	1,673	0,056	3,377	-	-	0,035	2,075	-	-	0,057	3,449
10	0,112	6,745	0,228	13,670	-	-	0,139	8,360	-	-	0,153	9,200
20	0,451	27,033	0,909	54,538	-	-	0,558	33,458	-	-	0,406	24,332
30	1,764	105,830	3,424	205,451	-	-	2,171	130,248	-	-	1,049	62,945
40	6,310	378,622	10,477	628,590	-	-	7,605	456,318	-	-	2,564	153,866
50	16,638	998,298	17,974	1078,448	-	-	18,828	1129,681	-	-	5,473	328,355
60	21,314	1278,849	12,424	745,460	-	-	21,588	1295,281	-	-	8,832	529,903
70	11,266	675,941	4,396	263,742	-	-	10,461	627,684	-	-	9,240	554,405
80	3,554	213,268	1,195	71,708	-	-	3,189	191,345	-	-	6,156	369,357
90	0,939	56,340	0,301	18,086	-	-	0,834	50,054	-	-	3,003	180,172
100	0,236	14,179	0,075	4,475	-	-	0,209	12,566	-	-	1,251	75,034
110	0,059	3,525	0,018	1,102	-	-	0,052	3,122	-	-	0,487	29,212

На 4-м году исследований максимальные суточные приросты сухой биомассы под защитой полос приходятся на разные периоды вегетации и растянуты во времени. Так, на расстоянии 2,5Н при τ = 80 прирост сухого вещества равен 5 г/сут, или 363 кг/га. На расстоянии 5Н от ЛП эта величина несколько меньше (257 кг/га, или 4 г/сут) и приходится на τ = 70. На расстоянии 10Н от ЛП максимальные суточные приросты при τ = 60, а на расстоянии 20Н они смещаются на более поздний период вегетации. Это объясняется тем, что на начальном этапе развития под защитой ЛП при большой влажности почвы и воздуха шло интенсивное, но меньшее чем на расстоянии 20Н, нарастание биомассы. На контроле был недостаток влаги на начальном этапе органогенеза, так как в открытом поле идет более интенсивное иссушение почвы, и суточные приросты невелики. После обильных осадков в июле-августе прирост на необлесенном поле стал возрастать и максимального показателя 266 кг/га (3 г/растение) достиг при τ = 90. В этот период должно идти накопление питательных веществ в початке, созревание и налив зерна, а не рост биомассы. Поэтому более благоприятные условия создаются для развития кукурузы под защитой ЛП.

Пятый год исследований был влажный. Но условия, складывающиеся под защитой ЛП, благоприятнее для развития кукурузы, чем на необлесенном поле, так как суточные приросты сухой биомассы на протяжении всего периода вегетации выше.

Подведением итогов суточных приростов надземной массы кукурузы является анализ максимального прироста за вегетацию (табл. 13). По данным таблицы видно, что гибридные и сортовые особенности возделываемой кукурузы и положительное влияние ЛП лежат в основе различий по массе.

Таблица 13

Максимальный прирост сырой (числитель) и сухой (знаменатель) надземной биомассы кукурузы за вегетацию под влиянием ЛП, г

Расстояние до ЛП, Н	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год
2,5	1510 480	780 260	1290 200	930 281	627 196
5	1010 340	980 230	1150 160	660 201	515 160
10	1310 450	750 230	1180 160	779 154	-
15	1280 360	750 160	1050 116	1110 354	657 207
20	840 280	680 160	1000 138	960 326	-
Контроль	540 170	600 160	480 167	390 217	390 119

В 1-й и 3-й годы наблюдались сорта ВИР-156 ТВ и Днепровский 98 МВ, районированные для Волгоградской обл. и выращиваемые на зерно и силос. Во 2-й год наблюдался югославский гибрид VC-183; в 4-й и 5-й – американский гибрид Элора. Независимо от погодных условий (1-й год засушливый, 3-й влажный), прирост сырой биомассы под влиянием ЗЛН всегда был больше: у кукурузы зернового типа в среднем за 3 года – в 1,5 раза (во 2-й год в 1,3 раза; в 4-й в 1,8 раза; в 5-й в 1,5 раза), а у силосной от 2,2 раза в 1-м до 2,4 раза в 3-м году. По сухой биомассе цифры варьируют, но в целом прослеживается та же тенденция.

Для аналитического выражения пространственной динамики продуктивности применялась экспоненциальная зависимость $M = a \cdot e^{-bL_H}$.

Аналитическое выражение и анализ его получения представлен в гл. 3.2 в формулах (19)-(24).

Полученные суточные приросты по сухой и сырой биомассе по каждому году позволили выявить общие закономерности ее развития. По осредненному за 5 лет максимальному приросту кукурузы построена кривая зависимости биомассы от расстояния до ЛП, описываемая экспоненциальной моделью (рис. 13) с разными коэффициентами для сырой и сухой биомасс (табл. 14).

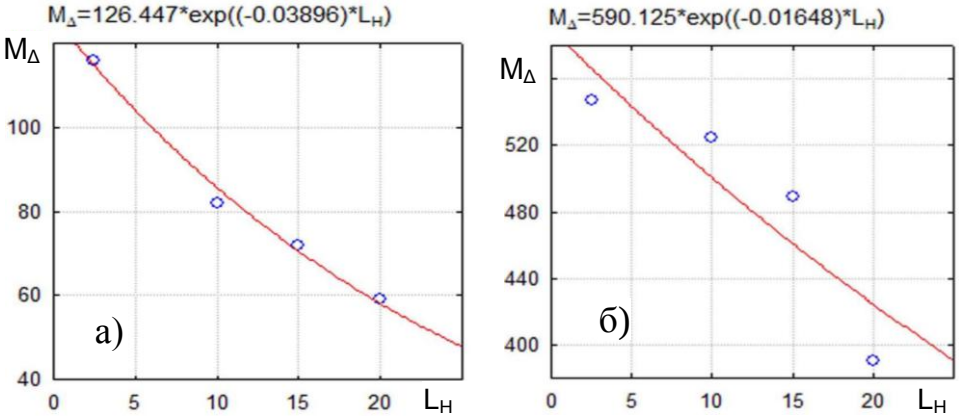

Рис. 13. Зависимость биомассы растения от расстояния до ЛП (а – сухая биомасса, б – сырая биомасса)

Таблица 14

Параметры обобщенного уравнения зависимости биомассы кукурузы от расстояния до ЛП и данные корреляционного анализа

Биомасса	Параметры уравнения		Коэффициент корреляции, R_{xy}	Ошибка коэффициента корреляции, S_r	Коэффициент детерминации, R^2
	a	*b*			
Сырая	590,125	–0,01648	0,91	0,08	0,82
Сухая	126,447	–0,03896	0,99	0,04	0,99

Из табл. 14 видно, что корреляционная связь между расстояниями до ЛП и биомассой очень тесная: $R = 0{,}91$ для сырой биомассы и $R = 0{,}99$ для сухой. Коэффициент детерминации равен 0,82 в первом случае и 0,99 во

втором. При сопоставлении расчетных данных $M_р$ с фактическими $M_ф$ (табл. 15) относительная ошибка ε очень мала и не превышает 3 %. Лишь для $L_н$ = 5 и на контроле она повышается до 19-24 %, что обусловлено, скорее всего, несоблюдением технологических особенностей выращивания культуры на поле или ошибкой при взятии средних стеблей. Высокий показатель ошибки (хотя для растений это немного) может также отражать интегральность числового значения биомассы как показателя. Биомасса растения включает в себя массу листьев, стеблей, початков, ростовые функции которых имеют разную скорость развития.

Таблица 15

Усредненные фактические $M_ф$ и расчетные $M_р$ данные по максимальному приросту сырой и сухой биомасс кукурузы, г

Расстояние до ЛП, Н	Сырая биомасса			Сухая биомасса		
	$M_ф$	$M_р$	ε, %	$M_ф$	$M_р$	ε, %
2,5	1027	1054	2,7	283	281	–0,1
5	863	1028	19,1	218	270	24,0
10	1005	979	–3,0	249	253	1,4
15	969	934	–3,0	239	238	–0,5
20	870	893	2,9	226	226	–0,2
Контроль	480	-	-	167	207	24,0

Предложенная модель экспоненциальной зависимости, согласно формулам (19), (23), подтверждает влияние ЛП на продуктивность биомассы кукурузы. Независимо от погодных и почвенных условий и особенностей сорта это дает возможность прогнозировать развитие сырой и сухой массы кукурузы на период вегетации в зоне влияния ЛП.

На основании обобщенного уравнения (29) рассчитана надземная масса кукурузы (табл. 16). Разброс относительной ошибки достаточно высок. Но связано это с тем, что исследования проводились на производственных посевах. При написании аналитического выражения по ос-

Таблица 16

Фактические $M_ф$ и расчетные $M_р$ данные сухой и сырой биомасс по годам для одного растения (г)

Расстояние от ЛП, Н	Сухая биомасса кукурузы			Сырая биомасса кукурузы		
	$M_ф$	$M_р$	ε, %	$M_ф$	$M_р$	ε, %
1	2	3	4	5	6	7
1-й год						
2,5	480	284	–40,9	1510	1114	–26,3
5	340	273	–19,6	1010	1088	7,7
10	450	256	–43,2	1310	1039	–20,7
15	360	241	–33,1	1230	994	–19,2
20	280	229	–18,4	840	953	13,5
Контроль	170	210	23,6	-	-	-

Продолжение табл. 16

1	2	3	4	5	6	7
2-й год						
2,5	260	274	5,3	780	1174	50,5
5	230	263	14,5	980	1148	17,1
10	230	246	6,8	750	1099	46,5
15	160	231	44,3	750	1054	40,5
20	160	219	36,6	680	1013	49,0
Контроль	160	200	25,0	-	-	-
3-й год						
2,5	200	252	25,9	1290	1054	–18,3
5	160	241	50,9	1150	1028	–10,6
10	160	223	39,7	1180	979	–17,0
15	116	209	80,0	1050	934	–11,0
20	138	197	42,4	1000	893	–10,7
4-й год						
2,5	281	321	17,7	930	964	3,7
5	201	320	59,4	660	938	42,1
10	154	303	96,5	797	889	11,5
15	354	288	–18,7	1110	844	–24,0
20	326	276	–15,4	950	803	–15,4
Контроль	217	257	18,5	-	-	-
5-й год						
2,5	196	233	18,7	627	964	53,8
5	160	222	39,0	515	938	82,1
15	207	190	–8,3	657	844	28,4
Контроль	119	159	33,7	-	-	-

редненным данным за 5-летие влияние таких факторов, как различная температура, влажность воздуха и почвы, развитие кукурузы на отдельных этапах органогенеза, несоблюдение технологий внесения удобрений повышает ошибку в измерениях. Расчет по годам для сырой и сухой биомасс надо рассматривать в целом.

Проблемная задача выявления влияния ЛП на прилегающие агроценозы, поставленная с целью разработки общих приемов прогнозирования показала, что ее можно решить не только опытным путем в поле, но и минимизировав полевые исследования с применением математического моделирования. Нами применялись методология и методы, характерные для экологических систем, принятых в фитоценологии. В фитоценологии в отличие от агроценологии не учитывается влияние ЛП на прилегающее пространство, решается проблема максимальной продуктивности фитоценозов, а не агроценозов, модели сообществ отличаются

от моделей отдельных популяций. В результате предложенной нами модели были получены уравнения логистической функции для различных гибридов кукурузы, для засушливых и влажных лет, позволяющие создавать прогнозные модели для орошаемых агролесоландшафтов в пространстве и во времени. Это упрощает процедуру нахождения суточных приростов, выявляет общие закономерности в развитии биомассы и дает возможность описывать ее экспоненциальной функцией.

4.3. Ассимилирующая поверхность и фотосинтетический потенциал сельскохозяйственных культур

Важной качественной характеристикой посевов, способных полно и с высоким КПД усваивать солнечную энергию, а следовательно, давать высокие урожаи, является оптимальная оптическая плотность листьев агроценозов при наличии большой суммарной поверхности ассимилирующих органов, в основном листьев (иногда, при большой кустистости, и стеблей, например люцерны, нута). Величина урожая, его высокая продуктивность связаны с целым рядом факторов, которые зависят от размеров листового аппарата, его количества, времени активной деятельности. Под продуктивностью урожая понимается способность данного сорта или гибрида давать максимальную полезную продукцию при расчетных условиях возделывания, т. е. потенциальную среднемаксимальную его производительность с единицы площади [61]. Посевы с малоразвитой площадью листьев, со сниженной интенсивностью фотосинтеза и низкой активностью процессов роста и органогенеза являются одной из причин низких урожаев.

Изучение ассимилирующей поверхности и ФП были проведены в орошаемых агролесоландшафтах на светло-каштановых почвах на кукурузе, различающейся биологическим временем развития. Образцы отбирали по фазам развития. Исследования проводили с гибридами и сортами, описанными в гл. 4.1.

Первый и второй годы наблюдений характеризовались как наиболее засушливые, причем во второй год погодные условия отличались от среднемноголетних резкими перепадами температуры воздуха. Третий, четвертый и пятый годы не отличались от среднемноголетних. В последний год – аномальный – количество осадков вдвое превышало норму. При исследовании динамики формирования урожая под влиянием ЛП особый интерес представляла площадь ассимилирующей поверхности, размерами которой определяется количество поглощенной солнечной радиации, идущей на построение хозяйственно ценной части урожая. Зная площадь листьев и густоту посева (60 тыс. раст./га – 1-3-й года; 70 тыс. раст./га – 4-6-й года), мы рассчитали ассимилирующую поверхность растений по формуле (25) за вегетационный сезон (табл. 17).

Таблица 17

Ассимилирующая поверхность растений кукурузы, тыс. м^2/га

Расстояние до ЛП, Н	1-й год				2-й год		3-й год		
	дни взятия проб								
	10	21	45	88	20	45	30	41	67
2,5	1,23	4,15	19,67	36,18	12,72	34,58	6,53	14,04	21,03
5	1,06	6,02	15,33	26,14	14,93	33,73	7,78	17,17	22,48
10	1,31	5,25	19,13	27,50	10,07	22,12	6,53	13,63	23,85
15	1,21	5,64	18,31	28,86	8,35	31,19	6,44	17,11	17,74
20	0,82	3,19	17,32	27,03	9,75	30,90	7,78	13,25	27,63
Контроль	0,82	5,15	15,93	22,69	9,47	31,18	5,62	10,92	25,48
Расстояние до ЛП, Н	4-й год				5-й год		6-й год		
	дни взятия проб								
	33	47	69	90	65	95	23	58	100
2,5	0,32	3,03	28,51	31,69	25,75	28,00	0,55	26,64	16,89
5	0,36	5,24	37,21	28,53	29,14	22,01	0,28	25,16	10,66
10	0,33	3,52	29,69	24,51	28,91	19,10	-	-	-
15	0,31	5,15	31,36	22,95	25,59	27,43	0,28	21,84	18,25
20	0,32	3,85	31,35	21,58	25,03	24,87	-	-	-
Контроль	-	-	-	-	19,04	17,07	0,27	18,92	12,13

Примечание. 1, 2-й года – ВИР-156 ТВ; 3-й – VC-183; 4-й – Днепровский 98 МВ; 5, 6-й – Элора.

Для математической обработки весь период вегетации представляли в виде временного ряда, совпадающего со сроками развития растений. ФП (интегральный показатель листовой массы), характеризующий работу посева за вегетацию, определяли суммированием площади листьев за период вегетации гибридов и сорта кукурузы. В результате сложения динамических рядов по годам был рассчитан средний многолетний показатель (формула (26), табл. 18).

Таблица 18

Фотосинтетический потенциал посевов кукурузы, млн м^2/га·сутки

Расстояние до ЛП, Н	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1989 г.	1992 г.	1993 г.	Средний многолетний
2,5	2,1	2,0	1,2	1,7	2,3	2,2	1,9
5	1,6	2,0	1,4	1,9	2,2	1,8	1,8
10	1,8	1,3	1,3	1,5	2,0	-	1,6
15	1,8	1,7	1,0	1,5	2,2	1,9	1,7
20	1,7	1,7	1,5	1,5	2,1	-	1,7
Контроль	1,5	1,7	1,3	-	1,5	1,5	1,5

Для аналитического описания ФП от времени развития и расстояния от ЛП использовалась программа "Statistica 6.0". Было получено уравнение экспоненциальной зависимости вида:

$$\Phi_{\text{п}} = 1{,}5 + 0{,}433e^{-0.069L_H}. \quad (31)$$

График зависимости представлен на рис. 14.

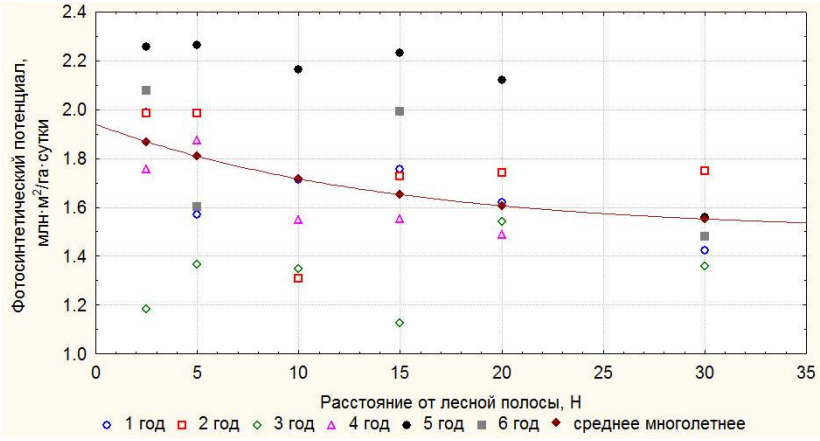

Рис. 14. График зависимости ФП посева кукурузы от расстояния от ЛП в нормированных величинах

Корреляционная связь между зонами поля и ФП тесная – R = 0,85. Коэффициент детерминации R^2 = 0,74 достаточно высок. Сопоставление фактических и расчетных данных (табл. 19) показывает высокую адекватность экспоненциальной функции, поскольку относительная ошибка ε не превышает 11 %. Это свидетельствует о возможности использования данного показателя как прогностического с высоким уровнем точности.

Таблица 19

Данные расчета ФП по экспоненциальному уравнению (31), млн м^2/га·дней

L_H, Н	$\Phi_ф$	$\Phi_Р$	ε, %
2,5	1,9	1,9	–2,1
5	1,8	1,8	1,5
10	1,6	1,8	10,6
15	1,7	1,7	1,3
20	1,7	1,7	–1,0
Контроль	1,5	1,6	8,3

Примечание. Здесь и в табл. 20 $\Phi_ф$ – фактический, $\Phi_р$ – расчетный фотосинтетический потенциал.

На основании полученных коэффициентов *a* и *b* для ФП по обобщенным данным рассчитан фотосинтетический потенциал для конкретных лет. Хорошими посевами считаются такие, ФП которых соответствует не менее чем 2 млн м^2 за сутки в расчете на каждые 100 дней фактической вегетации [62].

Относительные ошибки по конкретным годам (табл. 20) в основном не превышают 5-10 %. Большие относительные ошибки (до 15-20 %) в отдельные годы обусловлены следующими факторами: 1) ФП – расчетная величина; 2) почвенные разности достигают на отдельных полях нескольких тысяч; 3) описываемый процесс (продуктивность фотосинтеза) дина-

мичный, отражает совокупность факторов при развитии растений как объективных (влияние микроклимата), так и технологических, которые не всегда возможно учесть при отборе растительных образцов.

Таблица 20

Сравнительный анализ фактических и расчетных данных по фотосинтетическому потенциалу, млн м^2/га·дней

$L_н$, Н	*1-й год*			*2-й год*			*3-й год*		
	$Ф_ф$	$Ф_р$	ε, %	$Ф_ф$	$Ф_р$	ε, %	$Ф_ф$	$Ф_р$	ε, %
2,5	1,99	1,87	6,02	1,98	1,87	5,85	1,18	1,67	–41,00
5	1,57	1,81	–15,28	1,99	1,81	8,90	1,37	1,61	–17,70
10	1,71	1,72	–0,22	1,31	1,72	–31,27	1,35	1,52	–12,53
15	1,75	1,65	5,87	1,73	1,65	4,35	1,13	1,45	–28,86
20	1,62	1,61	0,94	1,74	1,61	7,67	1,54	1,41	8,66
Контроль	1,42	1,55	–9,12	1,75	1,55	11,21	1,36	1,35	0,48
	4-й год			*5-й год*			*6-й год*		
2,5	1,76	1,87	–6,31	2,26	1,97	12,76	2,08	1,87	10,03
5	1,87	1,81	3,49	2,26	1,91	15,67	1,60	1,81	–12,98
10	1,55	1,72	–10,96	2,16	1,82	16,03	-	1,72	-
15	1,55	1,65	–6,40	2,23	1,75	21,46	1,99	1,65	17,14
20	1,49	1,61	–7,96	2,12	1,71	19,61	-	1,61	-
Контроль	-	-	-	1,56	1,65	–5,98	1,48	1,55	–4,82

Таким образом, развитие листовой массы является закономерным процессом, который можно представить в виде расчетных величин, дающих возможность определять ФП независимо от погодных условий, сортовых и гибридных особенностей выращиваемых растений, что способствует прогнозированию развития урожая в зоне влияния ЛП.

4.4. Значение альбедо деятельной поверхности при формировании биопродуктивности

Изменение альбедо сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода определяется изменениями оптических свойств элементов растений и структуры растительного покрова в цикле развития растений.

Радиационный баланс подстилающей поверхности, являющийся одной из наиболее важных энергетических характеристик, представляет собой остаточную радиацию, или разность между приходящими к земной поверхности и уходящими от нее потоками лучистой коротковолновой и длинноволновой энергии. На практике чаще определяют отражательную способность различных поверхностей, или альбедо (*A*). Альбедо – это отношение отраженной радиации к суммарной, выраженное в

процентах: $A = \frac{R_к}{Q} \cdot 100$ [63].

ЗЛН определяют биогеофизическое воздействие и мелиоративное влияние на территорию, воздействуя на среду через атмосферу (надземной частью растений), или, другими словами, биомелиоративное – через почву (непосредственно через деятельность самих растений) – опадом листьев, биохимическими процессами. Безусловно, пространство внутри этой системы – влага воздуха, ветровой поток, наличие питательных веществ – меняется за счет малого круговорота веществ, создаваемого ЛП. Действие ЗЛН проявляется как непосредственно местно, локально (под пологом насаждений), так и пространственно. Для значительной части территории в районах вредоносной ветровой деятельности (дефляция, суховеи, метели) и эрозии пространственное влияние играет решающую роль. Принятие в полной мере этой очевидности имеет существенное значение для сельскохозяйственных производителей, так как дает возможность, при грамотном подходе, использовать лесомелиоративный геопространственный эффект для увеличения продуктивности сельхозкультур. Это происходит за счет трансформации, преобразования качественных и количественных характеристик энергомассопереноса. Безусловно, кривые изменения гидро-, аэро- и агрометеорологических характеристик имеют специфическую закономерность для различных условий с наличием точек экстремумов (максимумов и минимумов) и перегибов в непосредственной близости от ЛП, обычно до 5-10Н. Это обусловлено рядом факторов: турбулентностью и скоростью ветра, снегоотложением, увлажнением, наличием питательных веществ, удобрениями и т. д. Но их преобразование (существующая реальность) и связано непосредственно с ролью ЛП. При этом меняются радиационный и тепловой балансы, почвенно-биохимические, гидрофизические и гидродинамические процессы. Таким образом, прилегающая к ЗЛН зона (экотон) является пространством детерминированного хаоса [64]. При движении от ЛП к открытому пространству изменения всех параметров носят асимптотический характер с усилением случайной вариации характеристик и полным переходом к ней, что свидетельствует о переходе процессов в стационарный (квазистационарный) режим. Преобладание детерминированного характера процессов в переходной зоне, в отличие от вероятностного на ее границах, является одной из важнейших специфических особенностей лесомелиоративного эффекта [65].

Изучение воздействия элементов той или иной среды на жизнь агроценоза позволяет правильно применять агротехнические мероприятия, получать высокие устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур. Сельскохозяйственное производство в значительной степени находится под воздействием всего пространственно-неоднородного ком-

плекса элементов: мезо- и микрорельефа, местного климата (солнечная энергия, температура воздуха и почвы, влажность воздуха, осадки, ветра и т. д.) и условий хозяйствования.

Сельхозтоваропроизводители, фермеры, учитывая природные особенности и характер местного климата, соответственным образом обрабатывают почву, подбирают сорта культур, определяют сроки сева, обеспечивают уход за растениями и достигают высоких урожаев даже при очень неблагоприятных метеорологических условиях. Так, в первый период вегетации – в фазы посева, всходов, начала кущения, – когда растительный покров отсутствует или имеет малую сомкнутость, большое влияние на показатели альбедо оказывает непосредственно поверхность почвы. В зависимости от состояния увлажнения сельскохозяйственных полей альбедо может меняться в этот период в широких пределах. По наблюдениям в Эстонии [66] альбедо кукурузного поля в начале вегетации имело альбедо оголенной почвы и изменялось согласно влажности почвы. При этом среднее дневное значение альбедо дерново-слабоподзолистой супесчаной почвы с сухой поверхностью составляло 18-24 %, влажной 16-18 %, мокрой 11-16 % и увлажненной 8-11 %. Альбедо кукурузного поля и поля озимой пшеницы в Одесской обл. в фазу 3-го листа составляло 12-14 % [67]. Таким образом, можно считать, что альбедо на полях сельскохозяйственных культур в первые фазы вегетации близко к альбедо оголенной почвы данной почвенно-ландшафтной зоны. По мере роста и развития растений почва все более затеняется и после смыкания травостоя дальнейший рост растений не вызывает заметного увеличения альбедо [68]. По наблюдениям эстонских исследователей, флуктуации альбедо после смыкания травостоя коррелируют с изменением содержания воды в листьях. Н. П. Русин [69] также отмечает, что после выпадения осадков или поливов альбедо на полях озимой пшеницы и ячменя в Ростовской обл. уменьшалось на 2-3 % вследствие потемнения увлажненной почвы и зеленых органов растений. При суховее же, наоборот, альбедо увеличивалось на 3-5 %. Наибольшие значения альбедо сельскохозяйственных посевов, как правило, наблюдаются в фазы колошения, цветения или спелости. При этом выявляется достаточно четкая связь альбедо со степенью развития вегетативной массы растений. В Каменной степи на полях овса в фазу колошения альбедо поля, защищенного ЛП, составляло 22 %, в то время как на поле в открытой степи альбедо было равно 17 %. Различия в альбедо были связаны с тем, что на межполосном поле вследствие более благоприятных микроклиматических условий ячмень был почти в 2 раза выше и гуще (вес зеленой массы также был вдвое больше), чем в открытой степи, где большой вклад в общую величину давало альбедо оголенной почвы между растениями, которое составляло около 8-10 %.

По нашим данным, на светло-каштановых почвах (тестовый полигон "Горная Поляна") альбедо у ЛП равно 16,5 %, на расстоянии 2,5-10Н – 18 %.

Это объясняется сухостью почвы и микроклиматическим влиянием полос, так как, несмотря на разный режим водного питания растения ячменя за счет влияния ЛП на этих высотах имеют больший ФП. На расстоянии 20Н альбедо поверхности равно 22,8 % за счет большей влажности почвы, а на контроле 13,4 % при меньшей вегетативной массе посевов и большей сухости почвы. Зависимость нормированных величин альбедо и ФП ячменного агроценоза представлена на рис. 15.

Влажность почвы играет одну из главных ролей в обеспечении агроценоза питанием. При оптимальных условиях увлажнения на полях под сельскохозяйственными культурами влажность почвы изменяется по экспоненте, но в современных условиях хозяйствования этот подход не всегда сохраняется. Зная положительное влияние ЛП на агроценозы культур, агрономы используют это свойство для дополнительного полива растений на контроле, чтобы выровнять влагой действие ЛП. Влажность почвы на светло-каштановых почвах представлена в табл. 21.

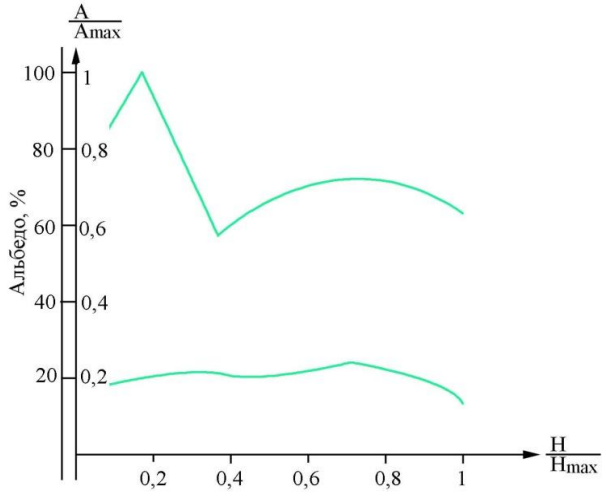

Рис. 15. Зависимость ФП посевов (верхняя кривая) и альбедо (нижняя кривая) от расстояния до ЛП (Н)

Таблица 21

Влажность почвы, тестовый полигон "Горная Поляна"

Расстояние от ЛП, Н	Влажность почвы, мм	
	число и месяц отбора образцов	
	28.05	07.07
2,5	214,0	221,5
5	204,1	185,9
10-15	-	172,0
Контроль	208,0	151,8

Анализ данных, полученных в июле, показал, что влажность почвы была равномерной и за счет положительного влияния полос в 1,3 раза больше под ЗЛН, чем на контроле, а неравномерность полива имела место только в мае.

Влияние ЛП на альбедо деятельной поверхности без агроценоза и с ним представлено на рис. 16. Как было отмечено ранее, изменение альбедо сельхозкультур в течение вегетационного периода определяется изменениями оптических свойств элементов растений и структуры раститель-

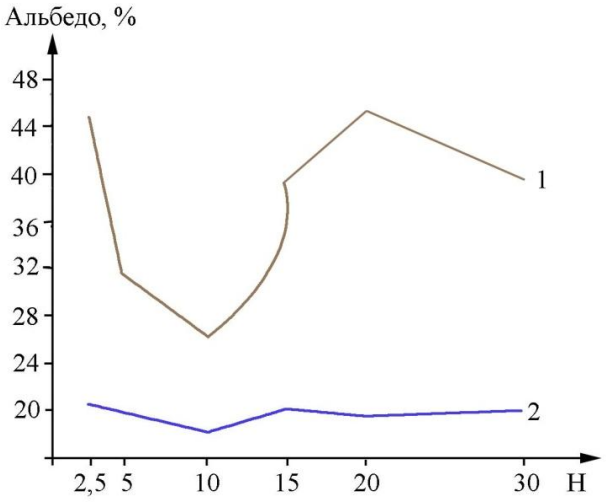

Рис. 16. Влияние ЛП на альбедо деятельной поверхности без агроценоза (1), в агроценозе (2)

ного покрова в цикле развития растений. Без растительного покрова оно зависит от типа и увлажнения почвы и меняется в широких пределах. Косвенное подтверждение повышенной влажности на контроле (см. табл. 21) получено при отборе почвенного образца 28.05 на светло-каштановых почвах, альбедо при этом равно 20,2 %; недоувлажнено на расстоянии 10Н – 18,8 % и на расстоянии 2,5Н – 21,1%. По мере роста и развития растений почва все более затемняется и после смыкания травостоя дальнейший рост растений не вызывает заметного увеличения альбедо (21-24 %). Нами получена четкая связь альбедо со степенью развития вегетативной массы растений.

Данные о влиянии ЛП на альбедо агроценоза сорго (см. рис. 16) при развитом растительном ценозе и фитометрические показатели продуктивности сорго подтверждают гипотезу о связи альбедо на поле с развитием растительного сообщества (табл. 22).

Таблица 22

Фитометрические показатели продуктивности сорго под влиянием ЛП, тестовый полигон "Горная Поляна"

Расстояние до ЛП, Н	Средняя высота стебля, см	Диаметр стебля, см	Средняя площадь листьев, $см^2$	Биомасса сырая, ц/га	Биомасса сухая, ц/га	ФП, тыс. $м^2$/га
2,5	95	0,8	215	217	48	29
5	98	0,7	246	320	63	33
10	41	0,6	103	51	14	14
15	54	0,7	131	112	26	18
20	59	0,5	115	88	21	15
Контроль	69	0,7	243	182	37	33

Анализ данных фитометрии агроценоза сорго и влажности почвы позволяет сделать следующие выводы. На расстоянии 10-15Н средняя высота стебля почти в 2 раза ниже, чем под влиянием ЗЛН. На расстоянии 5Н и на контроле при достаточно регулярном поливе в июле на росте сельхозкультур отразилось неравномерное распределение органического вещества (навоз), что и стимулировало неравномерное развитие биомассы. Дополнительная подкормка сказалась и на средней площади листьев: на расстоянии 2,5Н – 215 $см^2$, 5Н – 246, 10Н – 103, 15Н – 131 и на контроле 243 $см^2$.

Альбедо изучалось на тестовом полигоне "Качалинское" с каштановыми почвами. Были взяты образцы на влажность почвы, определены радиационные параметры отражательной способности пашни и агроценоза подсолнечника (табл. 23).

Таблица 23

Показатели влажности почвы и альбедо деятельной поверхности, тестовый полигон "Качалинское"

Расстояние до ЛП, Н	Влажность почвы, мм		Альбедо, %	
	26.05, пашня	21.07, агроценоз	26.05, пашня	21.07, агроценоз
5	231,2	141,2	44,0	62,3
10	-	116,2	-	22,6
15	-	113,1	-	21,9
Контроль	232,2	129,5	54,7	29,0

Анализ данных показал, что поле под агроценозом подсолнечника дополнительно увлажнялось. Влажность почвы на контроле была выше показателей под влиянием ЗЛН на пашне на 19 мм, а также выше показателей контроля в июле на агроценозе, так как при статистически средней под защитой ЛП (5-15Н) величина по влажности была 123,5 мм, что на 6 мм меньше, чем на контроле. Это подтверждается и показателями по альбедо деятельной поверхности. В мае величина его выше на открытом поле на 10,7 % за счет большей продуваемости поля и влажности почвы. В середине июля альбедо подсолнечника на расстоянии 5Н составляло 62,3 %, что в 2 раза больше показателей на контроле. Отражательная способность посевов очень тесно коррелирует с влажностью почвы и описывается линейной функцией $y = –135,68 + 1,36x$, коэффициент корреляции $R = 0,94$, что подтверждает высокую тесноту связи и достоверность полученной регрессии.

Зная процессы, происходящие в оптимальных условиях (соблюдение предусмотренной технологическими картами обработки почвы, агротехники, норм полива и т. д.), на основе их анализа можно установить недоработки сельхозпроизводителей, вскрыть их причины. Альбедо зависит от конкретных условий агроценоза. Это отражается на степени развития сельскохозяйственных культур, оптической плотности листьев и биомассе растений. Без растительного покрова альбедо коррелирует с влажностью почвы и зависит от влияния ЛП. Альбедо – показатель совокупности факторов, влияющих на развитие посевов, и самостоятельно не может быть показателем функциональной связи влияния ЛП.

4.5. Экологическая особенность структурной организации биопродуктивности агрофитоценозов

К. А. Тимирязев считал культивируемую растительность таким объектом, на который никогда не проходит мода, так как сельскохозяйствен-

ные культуры создают основу средств существования человечества [70]. Поэтому изучение агрофитоценозов позволяет выявить общие закономерности культивируемых сообществ, чтобы целенаправленно управлять ими.

К основным признакам агрофитоценоза, отличающим его от любого другого природного сообщества, относят: 1) господство растений, культивируемых человеком в соответствии с его потребностями; 2) определенные, заданные человеком количество и способ размещения возделываемых растений на площади; 3) специфичность состава сопутствующих сорных видов, обусловленная исторически, т. е. особенностями земледелия и условиями агротехники, природными свойствами культурных растений и создаваемой ими фитоценотической средой. В качестве характерных признаков агрофитоценоза рассматривается видовой состав, структура, взаимосвязь растений друг с другом и со средой, динамика сообществ с учетом особенностей обитания агрофитоценоза [71].

При совместном выращивании различных видов или сортов культурных растений большое значение имеет учет их биоморфологических особенностей – высоты, мощности надземной и подземной массы, сроков и темпов развития, отношения к минеральному составу и влажности почвы и т. п., – так как это позволяет судить об их средообразующей роли в агрофитоценозе.

По высоте, свойственной культурным растениям в благоприятных условиях произрастания, можно выделить три основные группы – растения первой, второй и третьей величины [47]. К растениям первой величины относятся культуры, которые в период своего полного развития достигают высоты от 120 до 600 см, например кукуруза, озимая рожь, пшеница, суданская трава, сорго. К растениям второй величины, вырастающим до 80-120 см, относят преимущественно яровые культуры – пшеницу, овес, ячмень. К растениям третьей величины – низкорослые и стелющиеся, высотой до 20-80 см, – овощные, корнеплоды, капуста, бахчевые, картофель.

Растения первой величины являются в основном светолюбами. Они имеют наиболее развитую корневую систему. Так, корни кукурузы, подсолнечника, суданской травы, озимой ржи идут на глубину 150-300 см. Среди растений второй и третьей величины есть растения средней теневыносливости, например овес, вика мохнатая, горох, а также растения как глубоко корневые, так и с менее развитой корневой системой. Особенно глубокую корневую систему имеет люцерна (ее корни углубляются до 15-20 м) и сахарная свекла (1,5-2,0 м). Менее развита корневая система у ячменя и гороха посевного – у них глубина проникновения корней в основном не более 60-80 см, у гречихи до 25-30 см [57].

В фитоценотическом отношении большой интерес представляет изучение распределения биомассы как надземной, так и особенно подземной при разных способах посева и разных нормах высева семян, а

также при разных сочетаниях культур в севообороте. Эти вопросы все еще остаются малоизученными. Между тем без данных о степени использования растениями воздушной и почвенной среды невозможно обоснование рациональной структуры агрофитоценозов.

За период исследований из растений, характерных для культурных сообществ, изучены 3 группы (табл. 24): растения I величины – подсолнечник (*Helianthus annus*), землепользование "Качалинское"; суданская трава (*Sorghum sudanensis* Piper.), учхоз "Горная Поляна"; кукуруза на силос (*Zea mays*), ООО "Лидер"; растения II величины – озимая пшеница "Безостая-1" (*Triticum* L.), ОАО "Ростовская областная опытно-мелиоративная станция" (ОАО "РООМС"); ячмень (*Hordeum* L.), СПК "Солодушинское", землепользование "Качалинское", ФГБНУ Богдинская НИАГЛОС ВНИАЛМИ, учхоз "Горная Поляна"; растение III величины – нут (*Cicer arietinum* L.), учхоз "Горная Поляна".

Таблица 24

Объекты исследования структурной организации агрофитоценозов в системе ЛП

Место исследований	Высота ЛП, м	Конструкция ЛП, кол-во рядов, породный состав, почва	Агроценоз	Год исследования
СПК "Солодушинское"	15	2-рядная, гибриды тополя, светло-каштановые	Озимый ячмень	1-й
Землепользование "Качалинское"	7	2-рядная, акация со смородиной золотистой, каштановые	Озимый ячмень	2-й
ОАО "РООМС"	10	7-рядная, акация белая с кустарником, чернозем	Озимая пшеница "Безостая-1"	
Богдинская НИАГЛОС	30	2-рядная, тополь пирамидальный х осокорь, пойменные	Ячмень "Донецкий-2"	3-й
Учхоз "Горная Поляна"	8	5-рядная, вяз со смородиной золотистой, каштановые	Ячмень "Донецкий-4" на зерно	
Учхоз "Горная Поляна"	8	5-рядная, вяз со смородиной золотистой, каштановые	Суданская трава на силос	4-й
Учхоз "Горная Поляна"	8	5-рядная, вяз со смородиной золотистой, каштановые	Нут	5-й
ООО "Лидер"	15	2-рядная, тополь пирамидальный х осокорь, светло-каштановые	Кукуруза на силос	4-й
Землепользование "Качалинское"	8	2-рядная, вязовая со смородиной золотистой, каштановые	Подсолнечник	

Из 5 лет исследований 4-й год был самым засушливым (табл. 25). Среднее количество дней с осадками в 4-м году за вегетационный период 4 дня, причем в июне осадков не было, температура воздуха была несколько выше. Самым влажным по количеству дней с осадками был 5-й год, но они выпадали неравномерно.

На исследуемых полях применялась основная обработка почвы – отвальная вспашка на глубину 25-27 см.

Таблица 25

Климатические характеристики периода исследований

Год исследования	Месяц наблюдения					Среднемесячное
	апрель	май	июнь	июль	август	
Количество дней с осадками						
1-й	6	8	3	4	13	6,8
2-й	6	3	5	4	8	5,2
3-й	5	5	3	5	4	4,4
4-й	13	1	0	1	4	3,8
5-й	10	11	3	4	8	7,2
Средняя относительная влажность, %						
1-й	67	55	68	48	47	57,0
2-й	70	66	68	65	51	64,0
3-й	67	56	47	50	55	55,0
4-й	58	58	47	49	53	53,0
5-й	71	58	63	61	58	62,2
Средняя температура воздуха, °С						
1-й	7	19	20	25	22	18,6
2-й	8	17	22	22	22	18,2
3-й	9	16	24	25	22	19,2
4-й	11	12	23	26	23	19,0
5-й	13	12	20	24	22	18,2

В повышении урожайности сельскохозяйственных культур большое значение имеет борьба с сорняками, так как повышение биопродуктивности агрофитоценозов возможно в случае производительного использования экологических ниш, которые обычно занимают сорняки. Успешное решение этого вопроса возможно лишь на основе знания биологии, экологии сорных растений, их фитоценотических связей с культурными растениями, выяснения причин их поселения и распространения среди культур.

Среди сорных растений обычно различают сегетальные, или сорно-полевые, растения-примеси и рудеральные, или мусорные.

Сегетальными (от лат. *segetalis* – растущие среди хлебов) называются такие растения, которые поселяются на полях помимо воли человека, так как вполне приспособились экологически и биологически к произрастанию вместе с культурными растениями [13]. Среди сегетальных сорняков выделяют группу так называемых специализированных видов, приспособленных к той или иной культуре в отношении сроков созревания, жизненного цикла, веса, формы семян и т. п. Вследствие сложности борьбы многие из них считаются карантинными, т. е. находятся под особым учетом в целях предотвращения их распространения.

Рудеральные растения (от лат. *ruderis* – щебень, мусор) – мусорные,

произрастают около строений, на пустырях, вдоль путей сообщения, т. е. на вторичных (не полевых – пашенных) местообитаниях. Как правило, являются нитрофилами [73]. Вместе с сегетальными растениями входят в группу сорных растений. За счет большой приспособительной способности (невзрачный вид, ядовитые вещества, крючки, колючки) могут попадать и в посевы культурных растений и сохраняться там в условиях постоянного воздействия со стороны человека, что дало основание отнести их к группе полукультурных [74].

В посевы и посадки сельскохозяйственных культур проникают представители флор различных типов растительности – лугового, степного, лесного. Так, типичный луговой мезофит пырей ползучий (*Agropyrum repens* (L.) P. B.) вследствие высокой способности к вегетативному размножению оказался весьма характерным и злостным полевым сорняком. Из луговых видов распространены в посевах лютик ползучий (*Ranunculus repens* (L.)), клевер ползучий (*Trifolium repens* (L.)), мятлик обыкновенный (*Poa sylvestre* L.) и луговой (*P. pratensis* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), подорожник большой (*Plantago major* L.), малый (*P. minor* L.) и ланцетолистный (*P. Lanceolata* L.); из лесных – бородавник (*Lapsona communis* L.), сыть обыкновенная (*Cyperus sylvestre* L.); из степных – полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.) [75]. Некоторые из этих видов на лугах являются ценными в кормовом отношении – пырей ползучий (*Agropyrum repens* (L.) P. B.), мятлик обыкновенный (*P. sylvestre* L.) и луговой (*P. pratensis* L.). Однако, попадая в посевы культурных растений, они наносят им ущерб, ограничивая в питательных веществах и влаге, притемняя их, иссушая почву и т. п., поэтому в посевах они считаются сорными.

К числу главных биологических свойств сорных растений, способствующих их распространению и длительному удержанию на том или ином местообитании, относится исключительно высокая их плодовитость, сильная растянутость периода прорастания и периода всхожести семян, различные требования к теплу, влаге, разнообразие способов расселения и др. [73].

Биологические и разнообразные экологические свойства сорных растений, как формы их приспособления к полевым условиям, обеспечивают им быстрое расселение на территории и устойчивость в посевах. Поэтому при ослаблении внимания человека к сорнякам они становятся серьезной угрозой сельскохозяйственному производству. Для предотвращения этого требуется систематическое соблюдение норм агротехники.

В исследуемых биоценозах сельхозкультур помимо культурных растений изучалась засоренность посевов [76] (табл. 26), проективное покрытие как основных фитоценозов, так и сорных растений, а также наличие детерминирующих видов сорняков. Под детерминирующими видами,

следуя Браун-Бланке [72], необходимо понимать виды, тяготеющие к более или менее определенным агроассоциациям и наиболее полно отражающие специфику местообитания этих ассоциаций.

Таблица 26

Засоренность агроценозов сорняками

Год исследований	Агроценоз и почвы	Детерминирующие и сопутствующие сорняки	Засоренность, %	Биопродуктивность, или урожайность культур, т/га
1-й	Ячменный (*Hordeum* L.), светло-каштановые	Бодяк полевой (*Cirsium arvense* Sc.)	30	1,4
2-й	Ячменный (*Hordeum* L.), каштановые	Пырей ползучий (*Agropirum repens* (L.) P. B.), щетинник зеленый (*Setaria viridis* L.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.)	1-2	1,9
3-й	Ячменный *(Hordeum distichon* (L.) Koern.), каштановые	Бодяк полевой (*Cirsium arvensis* L.)	40-50	1,7
4-й	Суданская трава (*Sorghum sudanensis* Piper.), каштановые		78-80	12,0
5-й	Нут (*Cicer arietinum* L.), каштановые		100	1,1

К детерминантам сегетального типа на ячменной агроассоциации в СПК "Солодушинское" относится бодяк полевой (*Cirsium arvense* Sc.), который представлен подавляющим большинством и являющийся характерным для данного сообщества. Процент засоренности в агроценозе около 30.

В землепользовании "Качалинское" на богарных землях агроассоциация озимого ячменя приурочена к 2-рядной акациевой ЛП с наветренной стороны. В данном случае на ячменной агроассоциации были выделены три типа сорняков рудерального и сегетального вида: пырей ползучий (*Agropyrum repens* (L.) P. B.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), щетинник зеленый (*Setaria viridis* L.). Встречаемость их на поле единичная. Процент засоренности по А. А. Часовенной [47] невысок (≈ 1-2), поэтому выделить детерминирующий вид в данном случае нельзя. Плотность посева ячменя 480 раст./м^2, кустистость небольшая.

В учхозе "Горная Поляна" исследования проводились в течение 3-х лет на одном поле в трехпольном севообороте. В 1-й год – агроассоциации ячменя двурядного (*Hordeum distichon* (L.) Koern.), сорт "Донецкий-4", расположенного под защитой 5-рядной вязовой ЛП (8 м) с кустарником смородиной золотистой, засоренность посева по А. А Часовенной [47] состав-

ляла 40-50 %. Детерминирующим видом по Braun-Blanguet [72] являлся бодяк полевой (*Cirsium arvense* L.). После ячменя на зерно на этом же поле была посеяна суданская трава (*Sorghum sudanensis* Piper.) на силос. Детерминирующим видом остался бодяк полевой (*Cirsium arvense* Sc.), засоренность культур составила 78-80 %. Среди сорняков сегетального и рудерального типа встречались также щирица загнутая (*Amarantus retroflexus* L.), щетинник зеленый (*Setaria viridis* L.), марь белая (*Chenopodium album* L.), пырей ползучий (*Agropyrum repens* (L.) P. B.), вьюнок полевой (*Convolvulus arvense* L.) и т. д. На 3-м году – агроассоциация нута (*Cicer arietinum* L.) была засорена на 100 %. Плотность посадки нута (*Cicer arietinum* L.) – 38 тыс. раст./га. С нашей точки зрения, такая засоренность поля связана с тем, что, во-первых, нут относится к растениям третьей величины, во-вторых, плотность посадки его невелика. При данном севообороте, чтобы уменьшить засоренность полей, необходимо увеличить плотность посадки культурных растений, высаживать растения первой величины и вести целенаправленную обработку почвы против детерминирующего сорняка.

Изучение структурной организации биопродуктивности агрофитоценозов в орошаемых и богарных лесоландшафтах и их экологических особенностей показало, что засоренность полей имеет свою специфику. В наших исследованиях бодяк полевой (*Cirsium arvense* Sc.) при орошении встречался во всех агроассоциациях и являлся детерминирующим видом. В богаре детерминирующего вида выделить не удалось. Согласно классификации принятой А. И. Мальцевым, Л. Б. Колокольниковым, А. А. Часовенной [47], бодяк полевой – многолетник, высота которого не превышает половины высоты растения культуры, где он встречается в агроассоциации. Согласно их исследованиям, бодяк полевой встречается в основном на севере, его семена распространяются с урожаем сельхозкультур. По нашим исследованиям, бодяк полевой приурочен также к агроассоциациям, расположенным на юге, встречается во всех агроассоциациях Волгоградской обл. и в севообороте, распространяется не только семенами с урожаем при уборке, но и самосевом до уборки культуры. Наши исследования подтверждают выводы Браун-Бланке относительно определения детерминирующего вида. Бодяк полевой (*Cirsium arvense* Sc.) тяготеет к ячменной агроассоциации, а также отражает специфику местообитаний, так как в учхозе "Горная Поляна" встречался во всех культурах на одном поле 3-польного севооборота. Поэтому при ведении современного хозяйства необходимо учитывать биологические особенности сорняков, их высокие адаптационные качества, экологические свойства, обеспечивающие устойчивость в посевах, снижающие в целом биопродуктивность агрофитоценоза.

5. ДИНАМИКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРУКТУРЫ УРОЖАЯ

5.1. Изменение структуры урожая

Урожайностью в Заволжье, как одной из составляющих проблемы продуктивности, занимались Б. В. Карузин, В. А. Бодров, Я. Д. Панфилов, А. Р. Константинов и Л. Р. Струзер, Б. В. Лабазников. Во Всероссийском научно-исследовательском институте агролесомелиорации (ВНИАЛМИ) проблему продуктивности решали А. М. Бялый, Ф. М. Касьянов, В. В. Захаров, В. М. Кретинин, З. М. Селянина, Г. Д. Фомичев, М. М. Лазарев. Вопросов продуктивности на орошаемых землях в своей работе касались А. М. Степанов, Н. Ю. Годунова, А. Г. Ломакин, уделяя внимание урожаю и его прибавкам и не затрагивая пространственных закономерностей развития сельскохозяйственных культур.

Ведение поливного хозяйства показывает, что орошение при отсутствии лесных насаждений устраняет лишь почвенную засуху и не полностью защищает сельхозкультуры от гибели, вызываемой атмосферной засухой.

Положительная роль ЛП, созданных на орошаемых полях и вдоль каналов, заключается:

в уменьшении скорости ветра на 30-50 %;

уменьшении испарения с почвы и испаряемости с водной поверхности на 20-30 %;

повышении влажности воздуха на 2-6 %;

снижении температуры воздуха летом на поле на 0,5-1,5 ºС и почвы на 0,5-2,5 ºС;

снижении испарения воды с водной струи при дождевании на 13 %;

обеспечении поступления воды за счет дополнительного снегоотложения в слой почвы 50-100 мм;

понижении уровня грунтовых вод в степной зоне на 20-30 см и сухой степи на 50-100 см;

увеличении содержания гумуса в почве на 4-13 т/га;

повышении урожая сельхозкультур на 20-40 % [77].

Урожайность культур при орошении в 2-3 раза выше, чем без орошения, но колебания урожая не исключаются, особенно в засушливые годы с проявлением суховеев.

Величина урожайности зерновых культур не дает ответа на вопрос, все ли потенциальные возможности растения были использованы при его формировании. Чтобы получить ответ, надо знать, как происхо-

дит формирование урожая в течение вегетации растений под влиянием среды. Основа методов оценки – структурный анализ урожая.

Исследования проводились на облесенных землях в южной части сухостепной зоны Кисловской и Заволжской ОС Николаевского р-на Волгоградской обл. ЛП в Заволжье 1973-1976 гг. посадки двухрядные, ажурной конструкции из тополя гибридного и вяза приземистого, высотой 15-25 м. Ветропроницаемость в облиственном состоянии 40-50 %. Ширина межполосных полей 450-800 м. Полив осуществлялся дождевальными агрегатами "Волжанка", "Фрегат" и ДДА-100М из открытых оросителей в более ранние периоды исследования. Облесенность пашни 2,5-3,0 %. Почвы среднесуглинистые. В ООО "Лидер" ЛП 1985-1989 гг. посадки, 2-3-рядные. Размещены по границам полей севооборотов с учетом ширины захвата дождевальных машин "Волжанка". Забор воды осуществлялся из трубопровода. Почвы среднесуглинистые. Высота ЛП 15-25 м. Межполосное расстояние 450-840 м. Объектом исследования являлась кукуруза, различающаяся биологическим временем развития (поздне- и и среднеспелая) и гибридными формами: ВИР-156 ТВ (1-й год), VC-183 (2-й год), Днепровский 98 МВ (3-й год), Элора (4, 5-й года). Точки отбора образцов урожая располагались перпендикулярно основным ветроударным ЛП по трансекте, на расстояниях кратных высоте ЛП (2,5; 5; 10; 15; 20Н). За контроль было взято расстояние, превышающее 20Н ЛП. Определение структуры урожая проводилось по общепринятой методике Госсортиспытания.

Урожай зерна в среднем под защитой ЛП был на 34 % больше по сравнению с контролем (табл. 27) и складывался из массы зерна с одного растения, выраженной в центнерах, и количества растений на 1 га. В показателях структуры урожая на разном удалении от ЛП четких закономерностей нет. Это отмечалось и ранее в работах Б. В. Лабазникова [78], А. М. Степанова [79], Н. Ю. Годуновой [80], О. В. Рулевой [81]. Очевидно, это связано с пестротой почвенного профиля на межполосном пространстве и организационно-техническими факторами в процессе формирования урожая.

Таблица 27

Урожай зерна кукурузы по годам наблюдений

Показатель	Урожай, ц/га				
	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год
Расстояние до ЛП, Н: 2,5	87,5	83,6	172,6	98,9	136,1
5	66,8	88,1	85,8	98,1	118,9
10	70,0	67,2	100,7	131,3	-
15	75,8	75,7	108,2	104,9	136,0
20	67,7	73,1	95,3	117,6	-
Средневзвешенная	72,6	75,5	112,7	113,1	131,8
Контроль	78,2	64,0	-	60,5	94,0

Первый год отличался от других по урожайности. Неблагоприятные условия для развития растений под защитой ЛП, небольшое количество осадков (30 мм за весенний период) при невыдержанной норме полива сказались на урожае. Урожай на контроле превышал средневзвешенную под защитой полос на 6 ц/га, хотя на расстоянии 2,5Н масса зерна с одного растения и урожай в целом (на 9 ц) были больше, чем вне влияния полос. Разницы в количестве початков не было (табл. 28). Масса початка под защитой ЛП была меньше, что и дало более высокие показатели урожая на контроле.

Таблица 28

Среднее количество початков на одно растение *N* и масса одного початка *m* по годам наблюдений

Показатель	1-й год		2-й год		3-й год		4-й год		5-й год	
	N, шт.	m, г	N, шт.	m, г	N, шт.	m, г	N, шт.	m, г	N, шт.	m, г
Расстояние до ЛП, Н: 2,5	1,0	169,0	1,0	165,3	1,5	365,5	1,8	230,1	1,0	292,3
5	1,1	122,5	1,0	190,7	1,2	183,0	1,2	223,3	1,0	263,9
10	1,4	145,7	1,1	129,6	1,0	214,5	1,6	319,1	-	-
15	1,1	165,3	1,0	156,1	1,0	224,0	1,4	263,3	1,0	273,4
20	1,4	144,6	1,0	152,1	1,4	208,0	1,4	294,0	-	-
Средневзвешенная	1,2	150,3	1,0	154,0	1,2	230,2	1,5	275,8	1,0	275,7
Контроль	1,2	169,8	1,0	134,7	-	-	1,0	141,6	1,0	192,4

Во 2-й и 3-й года прибавка под защитой ЛП составила 18 %, соответственно по годам 11 и 17 ц/га. Прибавка урожая складывалась за счет большей массы зерна с одного растения при равном количестве початков на контроле во 2-м году, а в 3-м – за счет большего количества початков под защитой ЛП (1,2 шт.; на контроле 1,0 шт.) и меньшей массы початка. В 4-м и 5-м годах разница урожая на контроле и под защитой ЛП составляет 87 и 40 % соответственно. Как отмечалось ранее, контроль в 4-м и 5-м годах был взят на необлесенной территории и влияние факторов, сглаживающихся действием ЛП, здесь проявилось более четко и более наглядно и отразилось на урожае. В 4-м году все показатели структуры урожая: масса початка, количество початков – были выше под защитой ЛП. Так, масса зерна варьировала с 63 % (по сравнению с контролем) на 2,5Н до 87 % в целом на всех растениях, что составило прибавку под защитой ЛП 52,6 ц/га.

Пятый год отличался от предыдущих лет засушливым маем и обилием осадков летом. Разницы по количеству початков под защитой ЛП и на контроле не выявлено. По остальным показателям: массе початков, массе зерна с одного растения, прибавке урожая под защитой полос – составила 26-45 % в зависимости от удаленности от ЛП, что дало средневзвешенный

урожай зерна 131,8 ц/га под защитой полос и 94 ц/га на контроле.

Чистая продуктивность фотосинтеза $Ф_{ч.пр}$ и площадь листовой поверхности – важнейшие слагаемые фотосинтетической деятельности растений. Чистая продуктивность фотосинтеза определяется делением величины урожая зерна на ФП посева и измеряется в г/м^2 за период вегетации растений (г/м^2·дней). Показатели $Ф_{ч.пр}$ варьировали по годам и в зависимости от расстояния от ЛП (табл. 29).

Таблица 29

Чистая продуктивность фотосинтеза, г/м^2·дней, по годам наблюдений

Показатель	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	Средняя многолетняя
Расстояние до ЛП, Н: 2,5	4,2	7,0	10,2	4,3	6,2	6,4
5	4,2	6,3	4,5	4,5	6,6	5,2
10	3,9	5,2	6,7	6,6	-	5,6
15	4,2	7,6	7,2	4,8	7,2	6,2
20	4,0	4,9	6,4	5,6	-	5,3
Средневзвешенная	4,1	6,1	7,1	5,1	6,8	5,7
Контроль	5,2	4,9	-	4,0	6,3	5,1

Фотосинтетическая деятельность посевов определяется четырьмя лимитирующими факторами: приходом радиации, тепловым, водным режимами и относительной площадью листьев [82]. При анализе $Ф_{ч.пр}$ по годам и на расстоянии от ЛП к этим факторам добавляется урожай зерна, который также отличается на разных расстояниях, а кроме того, сортовые особенности гибридов кукурузы и организационно-технические трудности. Но все-таки удалось выявить общую тенденцию в изменении чистой продуктивности фотосинтеза. По словам В. А. Кумакова, "…признавая перспективность агротехнических средств регулирования условий фотосинтетической деятельности, мы считаем, что и в селекции нужно искать пути повышения чистой продуктивности фотосинтеза через улучшение снабжения фотосинтетических органов водой, минеральной пищей, светом и углекислым газом" [83]. Это нашло подтверждение в наших исследованиях. Так, у кукурузы ВИР-156 ТВ в 1-й год и Днепровской 98 МВ во 2-й средневзвешенная под защитой полос $Ф_{ч.пр.}$ ниже в 1,3 и 1,2 раза соответственно, а по зерновой элитной кукурузе этот показатель выше для югославского гибрида VC-183 во 2-й год в 1,2 раза, в 4-й год в 1,3 раза, в 5-й год для американского гибрида Элора в 1,1 раза. То есть условия микроклимата под влиянием ЗЛН при оптимальных условиях выращивания кукурузы сказываются на повышенном выходе биомассы или зерна в зависимости от селекционной направленности возделываемого сорта или гибрида.

ФП – один из важнейших показателей, с которыми размеры урожаев коррелируют наиболее тесно. Анализом многолетнего материала по струк-

туре урожая выявлена линейная связь урожая зерна с ФП. Коэффициент корреляции составил 0,85. Аналитически эту зависимость можно описать уравнением

$$У_з = –46{,}04 + 82{,}2Ф_п, \quad (32)$$

где $У_з$ – урожай зерна (ц/га); $Ф_п$ – фотосинтетический потенциал посева (млн м^2·дней).

Урожай зерна $У_з$ с чистой $Ф_{ч.пр.}$ связан линейной зависимостью с коэффициентом корреляции $R = 0{,}90$, а уравнение имеет вид:

$$У_з = –35{,}58 + 22{,}95Ф_{ч.пр.}. \quad (33)$$

Чистая продуктивность фотосинтеза – неустойчивый показатель, но нами связь выявлена. Урожай зерна и ФП – интегральные показатели, линейно связанные между собой. Кроме того, ФП посева в пространстве (под влиянием ЗЛН) описывается экспонентой [84], следовательно, можно предположить, что и другие показатели структуры урожая в системе ЛП взаимосвязаны и изменяются по экспоненциальному закону.

Такая связь нами выявлена по массе 1000 зерен. Масса зерна формируется в фазу созревания, но на его развитие влияют условия всего периода вегетации – онтогенеза. Поэтому масса зерен и длина початка играют важную роль в общей доле урожая. Проанализировав массу 1000 зерен по годам на разном расстоянии от ЛП (табл. 30), получили уравнение экспоненциальной зависимости

$$М_{1000} = 0{,}96е^{-0{,}007L_н}, \quad (34)$$

где $М_{1000}$ – нормированная масса 1000 зерен, $L_Н$ – расстояние от ЛП, Н. Корреляционная связь между зонами поля и массой 1000 зерен тесная $R = –0{,}91$, $R^2 = 0{,}83$ (рис. 17).

Таблица 30

Масса 1000 зерен на разном расстоянии от ЛП по годам наблюдений

Расстояние до ЛП, Н	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	Средняя многолетняя
2,5	361,6	289,2	353,0	283,9	513,3	360,2
5	303,8	294,7	322,0	282,3	367,5	314,1
10	398,7	265,0	295,2	267,1	-	306,5
15	331,9	273,9	310,8	266,4	415,8	319,8
20	336,3	272,3	300,6	270,9	-	295,0
Контроль	323,0	262,7	-	178,1	354,3	279,5

Сопоставление средних фактических и расчетных данных (табл. 31) показывает адекватность экспоненциальной функции, так как относительная ошибка не превышает 7 %.

Адекватность модели была проверена также по пяти годам исследований. Относительная ошибка по каждому году не превышала 10 %, что свидетельствует о достаточной точности аппроксимации данных этим

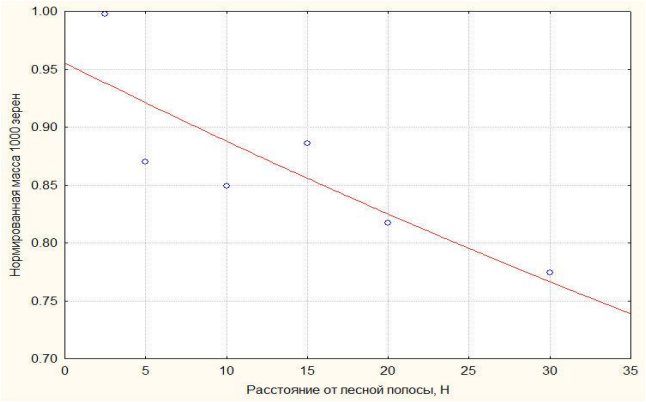

Рис. 17. Зависимость нормированной массы 1000 зерен от расстояния до ЛП

уравнением. Поэтому расчет массы 1000 зерен может быть рекомендован в качестве прогностического.

Проведенный анализ структуры урожая в зоне влияния ЛП показал их значимость на формирование урожая. Несмотря на пестроту данных по структуре урожая в межполосном пространстве удалось выявить линейную связь урожая зерна с ФП и чистой продуктивностью фотосинтеза. Построена модель зависимости массы 1000 зерен от межполосного расстояния, что дает возможность прогнозировать развитие сельскохозяйственных культур независимо от условий года и гибридных особенностей.

Таблица 31

Данные расчета массы 1000 зерен согласно формуле (34)

Расстояние до ЛП, Н	$M_ф$	$M_р$	ε, %
2,5	360,2	336,8	–6,5
5	314,1	326,3	3,9
10	306,5	310,7	1,4
15	319,8	300,4	–6,1
20	295,0	293,4	–0,5
Контроль	279,5	285,7	2,2

5.2. Качественные характеристики биомассы и зерна

Для целенаправленного управления агробиологическими процессами в ходе формирования урожая сельскохозяйственных культур необходимо знание закономерностей развития посевов в межполосном пространстве, которые позволяют выйти на прогноз развития агроценозов.

Важным вопросом мониторинга биопродуктивности являются три составляющие:

использование результатов научных исследований для обобщения и синтеза;

составление прогнозов развития продуктивности биомассы или формирования урожая [85];

применение полученных результатов на производстве.

Исследования в агротехнологическом подходе обычно предусматривают самостоятельное изучение объекта в зависимости от каждого отдельного фактора. У нас будут задействованы общие закономерности

развития сельскохозяйственных культур в межполосном пространстве, оценено влияние на развитие продуктивности трех основных факторов – почвенного плодородия, сортовых особенностей, связанных с качеством урожая, и роли ЛП.

Накопление и распределение сухого вещества в растении в большой степени зависит от условий минерального питания. В связи с этим накопление минеральных веществ в растении было предметом изучения многих ученых.

Нами была поставлена задача выяснить, как происходит изменение качества урожая на полях, защищенных ЛП.

Исследования проводились в Волгоградской обл. Почвенный покров представлен каштановыми почвами, суглинистыми, подстилаемыми на глубине 1,0-1,8 м песками, и солонцами с различной глубиной залегания карбонатов. С утяжелением механического состава почвы увеличивается их засоление и доля участия солонцов в почвенных комплексах. Морфологическая характеристика почвогрунта на одном из типичных участков приведена в табл. 32.

Таблица 32

Морфологическая характеристика каштановых почв по горизонтам

A	0-25 25	Пахотный горизонт темного цвета, комковатый, суглинистый, рыхлый, влажный, наличие корней травянистой растительности
B	25-35 10	Переходный горизонт коричневато-серого цвета, ореховатой структуры, суглинистый, плотный, влажный, наличие по профилю гумуса и корней травянистой растительности
C_1	35-80 45	Горизонт бурого цвета, призмовидно-ореховатой структуры, суглинистый, очень плотный, свежий, наличие в виде мицелия карбонатов
C_2	80-100 20	Светло-бурый горизонт, суглинистый, свежий, наличие в небольшом количестве белоглазки
C_3	100-125 25	Горизонт буроватого цвета, супесчаный, рыхлый, влажный
C_4	125-140 15	Супесь желтого цвета с суглинистыми прослойками; рыхлый, влажный
C_5	140-160 60	Песок желтый, рыхлый, влажный

Для каштановых почв характерна небольшая мощность гумусового горизонта (A + B) – 32-36 см. Глубина вскипания от соляной кислоты и залегания карбонатов колеблется с 38 см у средне- и тяжелосуглинистых разновидностей и с 65 см – у песчаных. Легкорастворимые соли отмечаются только у средне- и тяжелосуглинистых разновидностей на глубине 100-120 см. В засоленных каштановых почвах плотный остаток варьирует от 0,3 до 1,0 %, тип засоления сульфатно-кальциевый. Содержание гумуса в верхнем полуметровом горизонте 1-3 %.

Потребность растений в питательных веществах можно определить по выносу их урожаем основной и побочной продукции.

На полях п/ф "Восток", ООО "Лидер" и СПК "Солодушинское" в течение трех лет были взяты образцы на содержание валовых форм азота (N) и подвижных фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) в биомассе кукурузы за период вегетации (табл. 33). Для выяснения общих закономерностей развития растений в системе полос была применена математическая обработка, лежащая в основе обобщения и синтеза результатов, позволяющая выйти на прогнозы.

Таблица 33

Содержание N, P, K (%) в биомассе кукурузы за период вегетации в хозяйствах Волгоградской обл. на каштановых почвах

Расстояние от ЛП, L_H	П/ф "Восток"			ООО "Лидер"			СПК "Солодушинское"		
	дни взятия проб биомассы								
	30	41	67	30	41	67	30	41	67
Азот (N)									
2,5	3,02	2,27	1,92	3,05	2,02	2,88	7,65	4,40	3,55
5	2,56	2,30	1,78	2,75	2,12	2,09	6,47	2,59	4,53
10	2,53	2,63	1,83	2,52	2,18	1,96	5,07	5,74	2,07
15	2,57	2,07	1,75	2,78	2,13	1,93	5,40	6,40	4,20
20	2,74	2,02	1,16	-	-	-	4,80	6,27	3,55
Контроль	2,57	1,45	2,12	2,73	2,83	2,29	3,70	3,90	1,33
Фосфор (P_2O_5)									
2,5	1,21	1,10	1,01	0,91	0,63	0,54	0,99	0,61	0,56
5	1,18	0,79	0,83	0,93	0,59	0,54	0,70	0,50	0,41
10	0,91	0,91	0,58	0,87	0,66	0,46	0,55	1,00	0,39
15	0,94	0,92	0,53	0,81	0,52	0,65	0,73	0,94	0,57
20	0,93	0,75	0,42	-	-	-	0,70	1,10	0,53
Контроль	0,97	0,53	0,45	0,88	0,79	0,58	0,65	0,48	0,14
Калий (K_2O)									
2,5	4,37	2,93	2,60	4,93	2,80	2,08	6,62	2,61	2,59
5	4,53	2,90	2,68	3,63	2,53	1,80	5,41	3,87	3,09
10	5,47	3,40	2,40	3,40	2,37	2,50	5,30	4,66	2,49
15	4,60	3,53	3,20	3,17	2,53	2,60	6,00	2,61	2,80
20	4,50	3,37	1,88	-	-	-	6,12	4,23	3,42
Контроль	4,03	3,10	1,57	4,40	2,63	2,73	6,37	4,33	4,16

Регрессионный анализ парных зависимостей Y(N, P_2O_5, K_2O) и $X_1 = \tau$, где τ – дни вегетации, $X_2 = L_H$, где L_H = 2,5; 5; 10; 15; 20; 30Н, выявил их практическую линейность.

Взаимосвязь валовых форм азота и подвижных фосфора и калия в пространстве (на расстоянии от ЛП) за 2 года представлена в табл. 34, которую можно прокомментировать следующим образом. Относительная ошибка по азоту не превышала 11 % в п/ф "Восток", по фосфору и

калию ошибка расчетных данных к фактическим была больше. По ООО "Лидер" более точно описывается подвижная форма фосфора, ошибка в основном не превышала 15 %, по азоту – 20 %. По СПК "Солодушинское" относительная ошибка не превышала 20 %, а по азоту и калию она достигала иногда 30 %.

Таблица 34

Взаимосвязь валовых форм азота N и подвижных форм фосфора P_2O_5 и калия K_2O в межполосном пространстве в хозяйствах Волгоградской обл.

Расстояние от ЛП, Н	Фактические данные, %			Расчетные данные, %			ε %		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
П/ф "Восток", 1-й год									
2,5	3,02	1,21	4,37	2,69	1,16	4,44	–10,8	–4,5	1,7
	2,27	1,10	2,93	2,44	1,05	3,85	7,7	–4,9	31,3
	1,92	1,01	2,60	1,86	0,79	2,44	3,3	–22,0	–6,3
5	2,56	1,18	4,53	2,66	1,12	4,40	3,9	–5,2	–2,8
	2,30	0,79	2,90	2,41	1,00	3,81	4,8	27,8	31,3
	1,78	0,83	2,68	1,82	0,75	2,40	2,5	–9,5	–10,6
10	2,53	0,91	5,47	2,59	1,06	4,30	2,5	14,9	–21,0
	2,63	0,91	3,40	2,34	0,93	3,70	–10,8	2,9	9,6
	1,83	0,58	2,40	1,76	0,68	2,31	–3,9	16,9	–3,6
15	2,57	0,94	4,60	2,53	0,97	4,24	–1,7	3,4	–7,8
	2,07	0,92	3,53	2,28	0,86	3,60	10,1	–6,3	3,2
	1,75	0,63	3,20	1,69	0,60	2,23	–3,3	14,0	–30,3
20	2,74	0,93	4,50	2,46	0,90	4,16	–10,2	3,4	–7,6
	2,02	0,75	3,37	2,21	0,79	3,56	9,6	5,2	5,7
	1,16	0,42	1,88	1,63	0,53	2,15	40,2	26,3	14,3
30	2,57	0,97	4,03	2,33	0,75	3,99	–9,4	–22,6	–0,9
	1,45	0,53	3,10	2,08	0,64	3,40	43,5	21,0	9,6
	2,12	0,45	1,57	1,49	0,38	1,99	–29,5	–14,8	26,5
ООО "Лидер", 1-й год									
2,5	3,05	0,91	4,93	2,57	0,79	3,43	–15,8	–12,8	–30,5
	2,02	0,63	2,80	2,43	0,71	3,03	20,5	12,4	8,2
	2,88	0,54	2,08	2,12	0,51	2,09	–26,4	-6,5	0,3
5	2,75	0,93	3,63	2,58	0,80	3,45	–6,3	–14,1	–4,9
	2,12	0,59	2,53	2,45	0,71	3,05	15,4	20,9	20,6
	2,09	0,54	1,80	2,13	0,51	2,10	2,0	–5,5	17,2
10	2,52	0,87	3,40	2,60	0,81	3,50	3,2	–6,9	2,9
	218	0,66	2,37	2,47	0,72	3,10	13,2	9,7	30,7
	1,96	0,46	2,50	2,15	0,52	2,20	9,9	13,3	–13,8
15	2,78	0,81	3,17	2,62	0,82	3,54	–5,7	1,4	11,8
	2,13	0,52	2,53	2,40	0,74	3,14	16,8	41,4	24,3
	1,93	0,65	2,60	2,17	0,53	2,20	12,7	–18,1	–15,3
30	2,73	0,88	4,40	2,69	0,85	3,70	–1,6	–3,0	–16,3
	2,83	0,79	2,63	2,55	0,77	3,28	–9,8	–2,8	24,8
	2,29	0,58	2,73	2,24	0,56	2,34	–2,2	–2,6	–14,3

Продолжение табл. 34

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
СПК "Солодушинское", 2-й год									
2,5	7,65	0,99	6,62	6,32	0,83	5,51	–17,3	–16,5	–16,7
	4,40	0,61	2,61	4,91	0,67	3,54	11,8	9,9	35,8
	3,55	0,56	2,59	4,21	0,59	2,56	18,7	5,8	–1,1
5	6,47	0,70	5,41	6,19	0,81	5,60	–4,3	16,4	3,5
	2,59	0,50	3,87	4,78	0,66	3,63	84,6	31,7	–6,2
	4,53	0,41	3,09	4,08	0,58	2,65	–10,0	41,5	–14,3
10	5,07	0,55	5,30	0,79	0,79	5,77	16,7	43,7	8,9
	5,74	1,00	4,66	4,50	0,63	3,80	21,5	–36,6	–18,4
	2,07	0,39	2,49	3,80	0,56	2,82	83,6	42,5	13,3
15	5,40	0,73	6,00	5,64	0,77	5,90	4,5	4,9	–1,0
	6,40	0,94	2,61	4,20	0,61	3,98	–33,9	–35,2	52,3
	4,20	0,57	2,80	3,53	0,53	2,99	–16,1	–6,8	6,9
20	4,80	0,70	6,12	5,37	0,74	6,11	11,8	5,9	–0,1
	6,27	1,10	4,23	3,96	0,59	4,15	–36,9	–46,8	–2,0
	3,55	0,53	3,42	3,25	0,51	3,16	–8,4	–4,7	–7,5
30	3,70	0,65	6,37	4,81	0,69	6,46	30,1	6,5	1,4
	3,90	0,48	4,33	3,40	0,54	4,49	–12,7	11,7	3,7
	1,33	0,14	4,16	2,70	0,46	3,50	10,2	227,0	–15,6

В результате анализа было получено уравнение регрессии:

$$Y(\mathrm{N}, \mathrm{P_2O_5}, \mathrm{K_2O}) = a + b_1X_1 + b_2X_2. \qquad (35)$$

Данные коэффициентов a, b_1, b_2 и параметры множественного регрессионного анализа представлены в табл. 35.

Ошибка уравнения M_{vx} варьирует от 0,23 до 1,30. Это объясняется небольшим различием в общем фоне минеральных веществ в почве и подвижностью P_2O_5 и K_2O.

Парные коэффициенты R_{vx1} и R_{vx2} свидетельствуют о тесной связи между параметрами. Очень низкая связь между содержанием минеральных веществ в почве и зонами поля логически обусловлена R_{vx2}. Коэффициент корреляции между содержанием минеральных веществ и периодом вегетации, изменяющийся от –0,4 до –0,9, говорит о существовании связи. Она может быть невелика – коэффициент корреляции $R(K_2O)$ в п/ф "Восток" равен –0,41 или достаточно хорошо прослеживаться – по калию коэффициент $R(K_2O)$ в СПК "Солодушинское" равен –0,88. Коэффициент множественной корреляции показывает тесноту связи по всему массиву и дает основание использовать для аппроксимации уравнение множественной регрессии

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2, \qquad (36)$$

где X_1 – период вегетации; X_2 – расстояние от ЛП; Y – элемент минерального питания.

Таблица 35

Параметры множественного регрессионного анализа согласно формуле (36)

Y	a	b_1	b_2	M_{vx}	R_{vx1},	R_{vx2}	$R_{множ}$
П/ф "Восток"							
N	3,403	–0,023	0,013	0,32	–0,75	–0,26	0,79
P_2O_5	1,490	–9,931	–0,015	0,12	–0,65	–0,58	0,88
K_2O	6,115	–0,054	–0,016	0,57	–0,84	–0,15	0,85
ООО "Лидер"							
N	2,918	–0,012	0,004	0,36	–0,50	0,11	0,51
P_2O_5	1,023	0,008	0,002	0,10	–0,79	0,14	0,80
K_2O	4,493	–0,036	0,009	0,65	–0,69	0,11	0,70
СПК "Солодушинское"							
N	9,522	–0,047	–0,055	1,34	–0,55	–0,32	0,64
P_2O_5	1,178	–5,214	–4,894	0,23	–0,41	–0,19	0,45
K_2O	9,686	–0,066	0,034	0,63	–0,88	0,23	0,91

В результате парного регрессионного анализа установлено, что на ранних этапах развития тканям и органам растений свойственно наиболее высокое относительное содержание азота, фосфора и калия, которое с возрастом постепенно уменьшается. Аналогичные данные получены В. Г. Конаревым, Г. С. Курамшиновым [86-88] с кукурузой в Башкирии, а также учеными Волгоградского СХИ в условиях Нижнего Поволжья на орошении, но без ЛП.

Прямолинейная связь полученного уравнения позволяет рассчитать необходимое количество удобрений для заданного урожая для различных по влагообеспеченности лет.

В зоне рискованного земледелия, где в зональном аспекте плодородие само по себе уже ограничивающий фактор, в мониторинге биопродуктивности и урожая увеличивается роль влияния ЛП и сортовых и гибридных особенностей культур, более отзывчивых на ограничение питательных веществ в почве и использующих благоприятное влияние микроклимата ЛП в формировании продуктивности и урожая сельхозкультур.

6. ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА ОРОШАЕМЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

6.1. Эколого-биологические особенности развития сельскохозяйственных культур

Сельскохозяйственные культуры различаются по ботаническим и биологическим признакам, отношению к экологическим факторам (свет, тепло, воздух, элементы минерального питания), получаемой продукции, назначению и использованию в пищу человеком и животными. Все это разнообразие сельскохозяйственных растений объединяет выращивание под защитным влиянием ЛП в оптимальных при орошении условиях. Это свойство было использовано для математического моделирования продукционного процесса.

Среди многочисленных растений, имеющих важное значение для человека, на первом месте стоят злаки. К ним относятся не только все хлебные растения, которые дают основные продукты питания человеку, но и преобладающее количество луговых и степных трав, необходимых для кормления домашних животных, являющихся в основном травоядными.

Зерновые хлеба включают большую группу растений, имеющих огромное продовольственное значение. Среди них пшеница, кукуруза, рожь, рис, ячмень, сорго. В зависимости от биологических особенностей (морфологические признаки) и приемов возделывания зерновые культуры из сем. мятликовые (*Poaceae*) делят на две группы. В 1-ю входят пшеница, рожь, ячмень, сорго, рис. К хлебам 2-й группы относят крупяную культуру гречиху из сем. гречишные (*Polygonaceae*).

Жизненный цикл злаков можно рассматривать начинающимся с прорастания семени и заканчивающимся формированием зерновок. Длительность этого цикла у разных растений одной трибы или даже вида существенно различается [36, 57, 89]. В одном случае он заканчивается в течение одного вегетационного периода, т. е. растения относятся к яровым или однолетним формам. В другом случае цикл, начавшийся в текущем году, может быть завершен лишь в будущем, что характерно для озимых или двулетних форм растений. Разнообразие форм по продолжительности периода вегетации объясняется тем, что злаки, особенно рожь, ячмень, овес, имеют широкий ареал с большой амплитудой изменения условий освещения и температуры, что сказалось на ходе их развития и роста и наследственном закреплении особенностей этих процессов и механизма ре-

акции растений на сочетание условий внешней среды.

Важнейшими факторами, определяющими прохождение жизненного цикла растений, являются температура и световой режим. Рожь, ячмень и овес относятся к растениям холодостойким и длиннодневным, а просо – теплолюбивым и короткодневным.

Рожь, ячмень и овес представлены озимыми и яровыми формами и двуручками. Развитие и рост каждой из этих форм зависят от сочетания температурных и световых условий, характерных для данного района, или от целей научного эксперимента. Различные сочетания температуры и фотопериода могут служить причиной высокой вариабельности ячменей по тем или иным признакам [90]. Посев ячменей различной репродукции приводит к получению растений с различной формой колоса, с остями различной окраски, т. е. с признаками, несвойственными данному сорту. Это объясняется тем, что низкие температуры (4-8 °С) в период стадии яровизации и в период развития зародыша на материнском растении создают благоприятные условия для изменения многих признаков, часто ценных для селекции.

По отношению к влаге ячмень считается одним из наиболее засухоустойчивых хлебных злаков, хотя различные его сорта, а тем более ячмени различного географического происхождения сильно отличаются по реакции на недостаток влаги. Наиболее чувствителен ячмень к недостатку воды в период образования репродуктивных органов и особенно в период формирования пыльцы [91-93].

Рожь по своим биологическим особенностям способна более полно использовать осенне-зимние осадки; она имеет сравнительно небольшой коэффициент транспирации, является сравнительно засухоустойчивой культурой. Благодаря ряду биологических особенностей (мощное развитие корневой системы и раннее весеннее пробуждение) озимая рожь имеет преимущества перед озимой пшеницей. Максимальное количество влаги рожь расходует в период выхода в трубку и до периода колошения. К воздушной засухе рожь менее чувствительна, чем пшеница [57, 89].

По продолжительности жизненного цикла зерновые культуры, с учетом особенностей прохождения стадий яровизации, условно можно объединить в следующие группы: 1) яровые, 2) озимые. К яровым культурам, как известно, относятся сорта, способные при весенних сроках посева выколашиваться и созревать в этот же вегетационный период. К озимым относятся сорта, не способные выколашиваться при весеннем посеве. У яровых пшениц продолжительность жизненного цикла от всходов до полной зрелости в зависимости от степени скороспелости сорта составляет 65-115 дней, у озимых сортов – 180-200 на крайнем юге региона и 300-360 дней в северных районах. У ржи рода *Secale* L. в производстве встречается только один вид – культурная рожь (*S. cereale* L.).

В культуре распространена преимущественно озимая рожь [89, 94, 95].

Озимая пшеница – морозо- и зимостойкая культура. Однако она уступает в этом отношении озимой ржи. Минимальная температура воздуха для прорастания семян как пшеницы, так и ржи 1-2 °С, а оптимальная – у пшеницы 10-12 °С, у ржи 6-12 °С. Озимая пшеница кустится как осенью, так и весной, но более продуктивно осеннее кущение. Оптимальная температура для кущения 8-10 °С, при 5 °С оно прекращается. В бесснежные зимы озимая пшеница вымерзает при –16…–18 °С, при снежном покрове 20 см выдерживает морозы до –30 °С. Озимая рожь кустится осенью, но при прохладной погоде (4-5 °С) кущение и рост прекращаются. Рожь хорошо выдерживает зимние холода. Даже в бесснежные зимы выдерживает морозы до –25…–30 °С, а на глубине узла кущения до –18…–20 °С [36, 94].

Озимая рожь – относительно засухоустойчивое растение, но более требовательное к влаге, чем озимая пшеница. Транспирационный коэффициент пшеницы 250-350, ржи 340-420. Для озимой пшеницы наиболее пригодны плодородные, достаточно влажные, чистые от сорняков черноземные и темно-каштановые почвы с нейтральной реакцией (pH = 6,0-7,5). Рожь за счет мощной корневой системы и ее высокой усваивающей способности обеспечивает себя питательными веществами и влагой на песчаных, малоплодородных, дерново-подзолистых почвах с кислотностью pH 5,3.

Яровые зерновые хлеба делят на ранние и поздние. К ранним относятся яровая пшеница, яровой ячмень, а к поздним – кукуруза, рис.

Яровую пшеницу, ячмень высевают ранней весной. Они меньше кустятся, чем озимые, хуже противостоят сорнякам и засухе, позже созревают и уступают им по урожайности.

Семена яровой пшеницы начинают прорастать при температуре 1-2 °С. Однако массовые всходы появляются при 5-7 °С. Мягкая яровая пшеница более устойчива к низким температурам, чем твердая. Неблагоприятно сказывается на развитии растений температура воздуха 38-40 °С и более, а также сухие ветры, которые при 10-17 часах воздействия вызывают паралич устьиц [36, 94, 95], снижая урожай и качество зерна. Следует отметить, что мягкая и твердая пшеница различаются по требовательности к почве и температуре прорастания. Твердая менее устойчива к почвенной засухе, но лучше мягкой противостоит воздушной засухе.

Ячмень относится к роду *Hordeum* L. К теплу яровой ячмень малотребователен. Зерно прорастает при температуре 1-2 °С, но оптимальной температурой для прорастания является 6-12 °С. Всходы выдерживают кратковременные заморозки до –8…–9 °С. В период вегетации ячмень экономнее расходует воду, его транспирационный коэффициент равен 403. При оптимальных условиях увлажнения и температур возду-

ха коэффициент кущения ячменя составляет 2,5-3 [89, 94].

Кукуруза (*Zea mais* L.) используется как продовольственная, кормовая и техническая культура. Развивается в условиях относительно высоких температур, требует много света, потребляет в течение вегетации большое количество минеральных веществ. Отличительной особенностью гибридов зернового типа является большой выход зерна.

Кукуруза – однолетнее, однодомное, раздельнополое, перекрестноопыляющееся растение. Потребности кукурузы в различных факторах жизнедеятельности при орошении освещены в литературе достаточно полно. Детально исследован вопрос о потребности кукурузы в тепле и влаге [51, 96], световой энергии или фотосинтетически активной радиации [96-99]. Изучая гибриды кукурузы разных групп спелости целесообразно остановиться на энергетической потребности этих растений или потребности в солнечной радиации для прохождения полного цикла развития. По литературным данным [100, 101] коэффициент вариации энергетической потребности основных групп спелости кукурузы равен 5-6 %, что свидетельствует о достаточной стабильности значения фотосинтетически активной радиации. По данным исследователей, энергетическая потребность разных сортов кукурузы зависит от среднего количества листьев, развиваемых данным сортом [51, 96, 101].

Влияние термических факторов на рост и развитие сельскохозяйственных растений имеет многообразный характер. Потребность растений в тепле определяется биологическим минимумом температуры T_{min}, ниже которого растения прекращают вегетацию, температурным оптимумом T_{opt}, при котором наблюдается наибольшая продуктивность фотосинтетической деятельности растений, и биологическим максимумом температуры T_{max}, выше которого растения погибают. В литературе по этому вопросу приводятся различные данные. Так, например, у Б. А. Рубина [57, 101] для кукурузы T_{min} = 9,5 °С, T_{opt} = 33 °С, T_{max} = 46 °С. По А. А. Шиголеву [102] T_{min} для всего вегетационного периода составляет 6 °С. Возможно, вывод сделан на основании того, что при этой температуре у кукурузы пробуждается проросток. По данным Я. Хрушки [103], всходы большинства сортов появляются при температуре не ниже 9-10 °С. По другим исследованиям [104], температура почвы должна быть около 10-12 °С, для прорастания семян – 15-16 °С [105]. Всходы будут дружными и растения появятся на поверхности почвы уже через 7-10 дней после посева. Температура ниже T_{min} тормозит развитие растений, оказывает отрицательное действие на всхожесть семян, способствует снижению урожайности. Поэтому очень важны оптимальные сроки для развития семян. Указанные выше граничные значения температуры находятся в зависимости от периода развития и особенностей сорта растений. По-видимому, этим объясняется несопоставимость данных, приводимых разными авторами.

Оптимальная температура почвы для роста корней 24 °С, для роста надземных органов на ранних этапах развития 20 °С, а на более поздних 28 °С. Цветки лучше всего формируются при температуре почвы 28-32 °С [103].

По требованию к водному режиму кукуруза относится к мезофитам. Она может переносить временный недостаток воды в почве и пониженную относительную влажность воздуха. Однако длительные, жесткие метеорологические условия угнетают ростовые процессы, что, в свою очередь, приводит к снижению урожая как в количественном, так и в качественном отношении [94-96].

Кукуруза отличается экономным расходованием почвенной влаги на создание органической массы: ее транспирационный коэффициент, по обобщенным данным, составляет 250-400 [106].

По данным В. И. Остапова и Н. К. Дударя [107], при урожае зерна 8-10 т/га и зеленой массы 60-70 т/га суммарное водопотребление кукурузы составило в среднесухие годы 4,5-5,0, а в острозасушливые 6,0-6,5 тыс. $м^3$/га. А. Р. Константиновым с соавторами установлено, что расходы воды на создание единицы урожая зерна и силосной массы кукурузы на богаре в 1,5-2 раза выше, чем при орошении [108].

Зерновые бобовые культуры относятся к сем. бобовые (*Fabaceae*). Это горох, чечевица, фасоль, чина, нут, кормовые бобы, соя и т. д. По продолжительности жизненного цикла бобовые растения относятся к однолетним монокарпическим растениям.

В онтогенезе зернобобовых растений различают основные возрастные этапы: эмбриональный, ювенильный, или молодости, этап зрелости, размножения и старости. Эмбриональный период начинается с момента образования зиготы и заканчивается полным формированием зародыша семени. Он включает в себя собственно эмбриогенез и самостоятельную жизнь семени, когда протекают процессы, связанные с послеуборочным дозреванием и периодом покоя. Ювенильный период характеризует собой постэмбриональное развитие растения с прорастания семени до развития всех вегетативных органов – корней, листьев, стеблей. Наиболее благоприятные условия для роста этих органов обеспечивают интенсивный свет, определенная для каждого вида температура, влажность почвы и высокий уровень минерального питания. Этап зрелости характеризуется переходом от вегетативного роста к формированию генеративных органов в результате физиологических изменений, возникающих в конце этапа молодости под влиянием комплекса условий внешней среды, в основном температуры и света.

В практике за начало онтогенеза принято считать момент прорастания семян. Прорастанию семян бобовых, как и других растений, предшествует набухание. Наличие воды в семени является необходи-

мым условием интенсификации биохимических процессов, в результате которых под действием ферментов сложные углеводы и белки клеток семядолей становятся доступными для питания зародышу [57, 89, 95].

Зерновые бобовые растения в отношении температурного, светового и других факторов среды имеют специфические особенности. По реакции на температурный режим все виды и сорта зерновых бобовых растений можно разделить на две группы. К 1-й относятся растения, малотребовательные к температурам, способные при соответствующих условиях влажности расти и развиваться при широкой амплитуде температурного режима. Это бобы, горох, вика, чина, чечевица и др. Наряду с этой группой растений имеются виды, нормальное развитие и рост которых проходят при сравнительно высоких температурах, – соя, многие виды и сорта фасоли, а также новые культуры зернобобовых – бархатные бобы, голубиный горох. Прорастание семян 1-й группы растений может проходить при низких плюсовых температурах порядка 2-3°, второй группы – от 10 до 20 °С.

Фотопериодическая реакция бобовых растений находится в тесной связи с изменением спектрального состава света. Опыты с длинно-, короткодневными и нейтральными бобовыми растениями показали, что действие света, различного по спектральному составу, быстрее обнаруживается в условиях фотопериодов, несколько отличающихся от оптимума. При фотопериодах с оптимальной продолжительностью дня той или иной формы, при наличии всех других благоприятных условий среды существенных различий в развитии при разном качестве света не наблюдается [89, 109].

Основным веществом, определяющим пищевую и кормовую ценность семян бобовых культур, являются белки. Кроме них имеется крахмал, а у некоторых видов (соя, нут) в большом количестве содержится жир [57, 89, 95]. Зерновые бобовые культуры отличаются высоким содержанием белка (табл. 36), витаминов (B, C, D), провитаминами A и являются дешевым источником белкового питания. Содержание незаменимых основных аминокислот в белке бобовых в 1,5-3 раза больше, чем у злаковых.

Большое значение в интенсификации полевого и лугопастбищного кормопроизводства, повышении продуктивности всех кормовых угодий играет улучшение структуры посевов за счет клевера, люцерны, эспарцета. Бобовые травы должны занимать в полевом травосеянии 70-75 % пашни, так как играют важную роль в укреплении кормовой базы, отличаются высокой урожайностью и дают разнообразные и дешевые корма. Многолетние травы имеют и большое агротехническое значение, так как восстанавливают структуру почвы, очищают ее от сорняков и обогащают азотом и другими элементами пищи растений, т. е. повышают плодородие почвы. По данным академика Д. Н. Прянишникова, после 3-летнего использования люцерны в почве на 1 га накапливается столько органического вещества, сколько его содержится в 60-70 т навоза [94].

Таблица 36

Химический состав зерна хлебных злаков и бобовых культур, % на абсолютно сухое вещество, по Г. В. Бадиной [94]

Культура	Белки	Углеводы	Безазотистое вещество	Клетчатка
Пшеница: мягкая	13,9	79,9	-	2,3
твердая	16,0	77,4	2,1	2,4
Рожь	12,8	80,9	-	2,2
Ячмень	12,2	77,2	-	5,2
Овес	11,7	68,5	-	11,5
Кукуруза	11,6	78,9	-	2,6
Рис	7,6	72,5	-	11,8
Нут	25,0	-	49,0	4,0
Люпин узколистный	38,0	-	24,0	12,5

Люцерна синяя, или посевная, (*Medicago sativa* L.) относится к сем. бобовые (*Fabaceae*). Это очень древняя культура. Возделывание ее в Средней Азии насчитывает тысячелетия. Из многолетних бобовых трав по кормовым достоинствам люцерна является лучшей (в 1кг сена содержится 0,5-0,6 корм. ед., 127 г переваримого протеина).

Свекла сахарная, кормовая и листовая относятся к роду *Beta* сем. маревые (*Chenopodiaceae*). Род свекла (*Beta* L.) принадлежит к древнему подсемейству *Cyclolobeae*, у видов которого зародыш семени окружает питательные ткани перистерма. Семейство маревых включает около 1400 видов и 102 рода. Представители этого семейства широко распространены в пустынях, полупустынях и на засоленных почвах [110, 111].

Корнеплод сахарной свеклы имеет обратноконическую форму с куполообразной или конической головкой. Однако форма корнеплода изменяется в зависимости от агротехники и других внешних условий, особенно от влажности почвы [112, 113].

Для прорастания свекловичного семени необходима, прежде всего, влага, а также доступ кислорода и надлежащая температура. Минимальной температурой прорастания семян свеклы считали 4 °С. Однако по другим данным семена свеклы могут прорастать даже при температуре около 1 °С [113, 114]. Наибольшая скорость прорастания наблюдается при температуре около 30 °С, а наивысшая всхожесть, т. е. появление максимального количества ростков из 100 клубочков на 10-й день, при температуре 20-25 °С. Однако на практике свеклосеяние северной сахарной свеклы начинают обычно, когда среднесуточная температура почвы на глубине 5-10 см достигает 5-6 °С, а почва становится зрелой и хорошо разрабатывается. При таких обстоятельствах в большинстве районов свеклосеяния уже через 3-4 дня температура повышается до 8 °С и более [115, 116].

Большое значение для свеклы имеет предпосевная обработка се-

мян, цель которой ускорить получение выровненных всходов. Особенно часто применяют обычное замачивание семян (клубочков). Время набухания зависит от степени влажности и температуры окружающей среды. При недостаточной влажности почвы или низкой температуре набухание и появление всходов затягивается. Если семена перед посевом замочить и продержать их увлажненными при температуре 15-16°С в течение полутора суток, то клубочки набухают еще до посева. Такие семена прорастают интенсивнее, чем сухие, растут и фотосинтезируют раньше. Второй прием предварительной обработки – предпосевная яровизация. Яровизация свекловичных семян проводится при температуре около 3-7 °С, при наступлении устойчивого весеннего потепления. Третью группу составляют приемы предпосевной обработки семян при повышенной температуре (от 18 до 25 °С) в течение 6-12 дней [117].

В начальный период развития свеклы 1-го года жизни различают фазу прорастания, фазу "вилочки", одной-пяти пар листьев. В 1-й год жизни свекла образует вегетативные органы и лишь на 2-й приступает к репродукции. В полевых условиях наблюдается большое разнообразие в состоянии развития отдельных растений свеклы. Оно обусловлено качеством биотипов, входящих в состав сорта, и сочетанием факторов окружающей среды [95, 118].

К корнеплодам относятся также кормовая свекла, брюква, турнепс, морковь. Все эти культуры, но особенно сахарная свекла, отличаются высоким содержанием углеводов, минеральных солей и витаминов B_1, B_2, С, легкой переваримостью и усвояемостью. По питательности среди корнеплодов на первом месте стоит сахарная свекла.

Картофель – ценная продовольственная, кормовая и техническая культура, среди полевых культур занимает второе место после зерновых. Все сортовое многообразие картофеля в Европе связано с интенсивным селекционным использованием вида *Solanum tuberosum*. Насчитывается свыше 2000 сортов картофеля, связанных своим происхождением с *S. tuberosum*. Из этого числа распространены около 600 сортов. Картофель – вегетативно размножаемое растение. С этим связаны как генетические особенности отдельных сортов, так и их экологическая характеристика. Каждый сорт происходит от одного вегетативно размножаемого растения, т. е. является по существу клоном. Поэтому все растения данного сорта по генетической природе полностью тождественны. Кроме того, все существующие сорта по генетической природе – сложные гетерозиготные организмы. Поэтому при половом размножении расщепление в достаточно широких размерах происходит уже в первом генеративном поколении. Следовательно, отбор, выделение определенных форм могут быть начаты в первом поколении. Но сложная гетерозиготная природа затрудняет и селекционный процесс. Прогнозирование появления опре-

деленных форм может быть очень приблизительным. У картофельного растения на протяжении многих тысячелетий развивался и совершенствовался вегетативный путь размножения. В результате естественного отбора в этом направлении образовались специальные органы вегетативного размножения – клубни [95, 118].

По своим биологическим особенностям картофель существенно отличается от большинства сельскохозяйственных растений. Это обусловлено особенностями, выработанными им в филогенезе и в течение нескольких столетий. Картофель принадлежит к растениям, наиболее способным к акклиматизации, он неприхотлив к климату и почве, легко приспосабливается к самым различным условиям среды [119], может произрастать на тяжелых почвах, болотных, с сыпучими песками, на богарных участках крайнего юга и тундровых землях севера. Для нормального развития картофеля необходима хорошая аэрация почвы. По данным J. Buschell, корни картофеля поглощают кислорода больше в десятки раз, чем большинство других сельскохозяйственных растений [120]. Интенсивность дыхания корней картофеля колеблется в пределах 7-12 мл O_2/ч на 1 г сухого веса корней, что в 5 раз выше интенсивности дыхания корней подсолнечника.

Картофельное растение чувствительно к действию отрицательных температур. Ботва повреждается при температуре –1,0…–1,5 °С и при длительном действии такой температуры может погибнуть. Устойчивость к действию отрицательных температур в зависимости от сорта колеблется в пределах –1…–2°. Клубни картофеля погибают от заморозков в зависимости от длительности их действия. Так при –6 °С гибель наблюдается через 8 ч, а при –9 °С через 1 ч.

Картофель – растение умеренного, влажного климата и рыхлых почв. На родине культурного картофеля (S. *tuberosum*) в районах Чили клубнеобразование в течение тысячелетий протекало в условиях обильного увлажнения (до 3000 мм) при среднесуточной температуре воздуха 10,0-15,3 °С, высокой относительной влажности воздуха (выше 75 %) в течение вегетации. В процессе филогенеза картофель приспособился к пониженным температурам, избыточному увлажнению и средней длине дня. Нормальное клубнеобразование происходит при температуре почвы не выше 18-19 °С. Для ранних сортов наиболее благоприятная температура клубнеобразования 17 °С, а для среднеспелых сортов 19 °С [118, 121]. Картофельное растение требовательно к свету. В тени от ЛП обнаруживаются признаки угнетения, что ведет к пожелтению ботвы и вытягиванию стеблей и снижению урожая клубней.

В клубнях картофеля содержится около 25,0 % сухих веществ, в т. ч. крахмала 14,0-22,0, белка 1,4-3,0, клетчатки около 1,0 %. Картофель богат витаминами С, группы В (B_1, B_2, B_6), D, РР и К. Он является важнейшим продуктом питания.

К группе прядильных относятся растения разных ботанических свойств, образующие волокно на семенах в виде свободных волосков (лен, хлопчатник, конопля). В мировом земледелии наибольшие площади занимают хлопчатник, лен, конопля, они дают более 80 % всего натурального волокна. Хлопчатник (*Gossypium* L.) относится к сем. мальвовые. Это многолетний тропический кустарник, но в нашей стране возделывается как однолетнее растение. Стебель прямой, одревеснеющий, ветвящийся, высотой 1,5-2,5 м. Ветви образуются из почек, расположенных в пазухах листьев.

К масличным культурам относится большая группа растений, в семенах которых содержатся жирные масла. В данной работе рассматривается, главным образом, подсолнечник, так как опыт выращивания этой культуры под защитой лесных насаждений широко используется в производственной практике. Кроме того, подсолнечник является основной масличной культурой в нашей стране. Его семена составляют 90 % сырья, перерабатываемого масложировой промышленностью. Содержание масла в семенах подсолнечника достигает 55-60 %. Подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) принадлежит к сем. астровые (*Asteraceae*) и является перекрестноопыляющимся однолетним растением. Корень у него стержневой, проникающий в почву на глубину 2-3 м и распространяющийся в сторону, за счет придаточных корней, до 120 см. Это дает подсолнечнику возможность произрастать в степных засушливых районах. Стебель прямостоячий высотой 2-3 м, заканчивающийся соцветием – корзинкой диаметром 8-40 см.

Проблему продуктивности сельскохозяйственных культур в агролесомелиорации объединяет общая методология, вытекающая из накопленных знаний по количественным и качественным показателям развития агроценозов под ЗЛН. Именно поэтому для изучения проблемы, есть ли влияние ЛП на агроценозы и насколько оно велико, были использованы современные достижения научных исследований в области системного анализа, математики, вычислительной техники, моделирования, натурных наблюдений. Применение системного анализа вытекает из самой природы сложных агролесосистем. Причем, по мнению ряда авторов [48, 52, 122, 123], сложные системы необходимо изучать в первую очередь с применением системного подхода и моделирования. Он включает строго формализованные методы (оптимизация, принятие решений, передача информации), методы, направленные на формализацию (экспериментальные решения, построение моделей) и не формализуемые (формирование проблем, определение критериев, генерирование альтернатив) [124-126]. В связи с этим для определения влияния ЛП на продуктивность сельхозкультур необходимо привлечение методов аналитического, структурно-функционального и системного анализов, поскольку изучается живой объект, динамично развивающийся и сложный по своей сути.

6.2. Модель продукционного процесса

Предыдущие исследователи, отмечая положительную роль ЛП в развитии сельскохозяйственных культур, давали в основном качественную характеристику [127]. А. Р. Константинов и Л. Р. Струзер [128] на основе осреднения экспериментальных данных получили гиперболические зависимости для яровой и озимой пшеницы относительно расстояния до ЛП, рассчитанные по испаряемости и прибавкам урожая.

За основу моделирования нами взяты собственные 30-летние исследования по 92 вариантам элементов структуры и урожая сельскохозяйственных культур и 4 факторам, а также обобщенные данные других исследователей [127] за 7-летний период по следующим культурам: свекле, картофелю, хлопку, чайным кустам, люцерне, рису, кукурузе, ячменю, подсолнечнику, нуту, яровой и озимой пшенице. Факторы представлены географическим положением, различными зонами (почвенные характеристики) и регионами исследований, породным составом, количеством рядов, высотой ЛП и смешением.

Математическая модель пространственно-временной динамики (см. в гл. 4), полученная для кукурузы разных групп спелости и сортов (гибридов), дает основание утверждать, что все сельскохозяйственные культуры развиваются под влиянием ЛП в течение вегетации по логистической зависимости, а в пространстве межполосной клетки – по экспоненте.

Применение регрессионного анализа позволило описать фактические данные y (элементы структуры и урожая сельскохозяйственных культур), различающиеся параметрами a и b, в зависимости от x (расстояние до ЛП) в пространстве единым уравнением экспоненциальной зависимости $y = a \cdot e^{-bx}$. Коэффициент корреляционных отношений R = 0,80-0,99 показывает сильную степень связи между элементами структуры, урожаем культур и расстоянием от ЛП. Корреляционная структура многих сельскохозяйственных растений представлена "корреляционным скелетом", связывающим все признаки в единое целое. От силы связи между признаками зависит степень интегрированности объекта, отсюда и разные коэффициенты корреляционных отношений, но в пределах допустимых для биологических объектов (0,60). Важной особенностью корреляционной структуры признаков любого организма является то, что они связаны друг с другом не хаотически, а образуют группы или скопления. Каждая из них объединяет признаки, сильнее связанные с расстоянием от ЛП (высота растений, количество колосков в метелке и т. д.) или слабее (число растений на погонный метр, урожай хлопка в 1 коробочке). Выявление функциональных связей между элементами "корреляционного скелета" доказывает связь каждого элемента структуры урожая с ЛП на период онтогенеза. Следовательно, дает воз-

можность определять динамику растений в системе полос на любом этапе, не изымая их на протяжении вегетации.

Для приведения к единым единицам измерения фактические данные нормируются и сводятся в корреляционную решетку.

Анализ данных показал, что все 92 элемента структуры урожая хорошо описываются экспоненциальной зависимостью, кроме нута (табл. 37). Высота главного стебля относительно расстояния от ЛП аппроксимируется экспоненциальной функцией с коэффициентом детерминации R^2 = 0,46. Это объяснимо с биологической точки зрения. Высота стеблей у нута стелющаяся. Для математической обработки учитывался главный стебель, так как развитие под полосой и на контроле различалось в онтогенетическом отношении. Под ЛП на расстоянии 2,5Н растения были более мощные, кустистые, чем на контроле. Поэтому для рендоминизированности сравнения вариант на высотах и контроле была взята высота главного стебля. Известно, что нут из семейства *Fabacia*, следовательно, способен стелиться по земле, поэтому в сравнении со стоячими стеблями коэффициент детерминации, показывающий эту связь, относительно низок. Но коэффициент детерминации биомассы нута с расстоянием от ЛП R^2 = 0,76, т. е. зависимость, устойчивая. В целом по 92 вариантам структуры урожая коэффициент детерминации R^2 = 0,7-0,9 применяемой функции свидетельствует об удовлетворительной аппроксимации, модель экспоненциального изменения развития сельскохозяйственных культур в системе ЛП в пространстве закономерна и адекватна описываемому явлению. Согласно предложенному нами концептуальному подходу, при наличии тесной связи в корреляционной структуре объекта, на что указывает коэффициент детерминации, предусматривается дальнейший анализ зависимостей по параметрам *a* и *b* [129]. Для этого нормированные данные по элементам структуры урожая (высота стебля, количество коробочек на стебле, биомасса и т. д.) группируются по культурам. Соответственно, для каждой сельскохозяйственной культуры: свеклы, картофеля, хлопка, чайных кустов, люцерны, риса, кукурузы, ячменя, нута, подсолнечника, яровой и озимой пшеницы (табл. 38) – нами получены нормированные осредненные величины, по которым строятся функциональные зависимости (рис. 18). Каждая из вышеперечисленных культур представлена экспоненциальной зависимостью в системе координат. Параметры уравнений полученных зависимостей сведены в табл. 39.

Коэффициенты детерминации R^2 применяемой функции говорят об удовлетворительной аппроксимации, т. е. экспоненциальная модель развития перечисленных сельскохозяйственных культур под защитным влиянием ЛП при орошении адекватна описываемому явлению.

Для подтверждения достоверности обобщенных экспоненциальных зависимостей был проведен сравнительный анализ по параметрам *a* и *b* биопродуктивности сельскохозяйственных культур (табл. 40). Стандарт-

Таблица 37

Параметры изменения лесных насаждений и ценозов межполосного поля анализируемых объектов, определяемые функцией вида $y = a \cdot e^{-bx}$

Действующий фактор				Элемент структуры	Параметр уравнения		Коэффициент детерминации, R^2
географическое положение	конструкция ЛП, рядность, высота	почва	сельхозкультура		a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8
Свекла							
Куйбышевское Заволжье: к-з им. Ворошилова	2-рядная продуваемая, 7 м	Обыкновенный чернозем	Сахарная свекла Рамонская 1537	Урожай	0,96	0,44	0,75
Кутулукская ОС			Сахарная свекла	Число растений на пог. м	0,85	0,40	0,70
Кутулукская ОС			Сахарная свекла Рамонская 1537	Урожай	1,03	0,26	0,98
Восточная Грузия	Плодовопитомническое хозяйство Бебриси	Каштановые	Свекла	Урожай	1,02	0,27	0,66
Куйбышевское Заволжье, Кутулукская ОС	5-рядные, продуваемые, 9-10 м, система полос	Обыкновенный чернозем	Свекла Рамонская 1537	Урожай	1,05	0,2	0,96
			Свекла Рамонская 036		1,03	0,12	0,97
			Свекла Верхняческая 031		1,01	0,07	0,47
			Свекла Верхняческая 038		1,04	0,42	0,65
			Свекла Ялтушковская		1,04	0,20	0,81
			Свекла Янаш 1		1,05	0,25	0,88
Чайный куст							
Азербайджан, к-з "Правда"	ЛП 1935 г. закладки	Красноземы	Чайный куст	Урожай зеленого листа	1,07	0,95	0,93
Азербайджан, Ленкорань, с-з "Аврора"	ЛП 7 м, закрытая система			Масса листьев	1,04	0,16	0,90
				Высота растений	1,03	0,12	0,95
				Масса кустов	1,04	0,16	0,95

Продолжение табл. 37

1	2	3	4	5	6	7	8
Хлопок							
Узбекистан, Бухарский р-н, к-з "Ленинизм"	Закрытая система ажурной конструкции, 7 м	Серозем	Хлопок-сырец	Масса хлопка-сырца в 1 коробочке	0,96	0,31	0,82
			Хлопок	Урожай	1,03	0,38	0,82
Средняя Азия, Азербайджанский ин-т хлопководства, Шамхорская станция	3-рядная ажурная полоса	Красноозем	Хлопчатник 2795, нерайонированный сорт	Высота главного стебля	1,1	0,65	0,99
				Число коробочек на кусте	1,04	0,31	0,76
				Масса хлопка-сырца в 1 коробочке	1,00	0,19	0,68
			Хлопчатник 2421	Высота главного стебля	1,03	0,38	0,96
				Число коробочек на кусте	1,12	0,56	0,96
				Урожай	1,00	0,26	0,77
				Высота главного стебля	1,02	0,26	0,99
				Число коробочек на кусте	1,07	0,54	0,88
				Число плодовых ветвей на кусте	1,02	0,23	0,85
				Масса хлопка-сырца в 1 коробочке	1,00	0,32	0,93
				Густота стояния растений	1,04	0,24	0,95
				Урожай	1,04	0,24	0,97
Люцерна							
Нижнее Поволжье Старополтавский р-н, с-з "Посевной"	2-рядная полоса, ива, 11 м	Светло-каштановые	Люцерна 3 года	Высота растений	0,94	0,70	0,79
				Число растений на 1 $м^2$	1,08	0,81	0,91
				Сырой вес укосной массы	0,95	1,16	0,87
Яровая пшеница							
Куйбышевское Заволжье, Кутулукская ОС	2-рядные, продуваемые, 7 м	Обыкновенный чернозем	Яровая пшеница Безенчукская 98	Высота растений	1,04	0,39	0,96

Продолжение табл. 37

1	2	3	4	5	6	7	8
Астраханская обл., Богдинская НИАГЛОС	2-рядная, то-полевая, 27 м	Пойменные	Яровая пшеница с-503	Кол-во стеблей	1,03	0,1	0,98
				Высота стеблей	1,07	0,30	0,96
				Длина колоса	1,05	0,15	1,00
				Число зерен в колосе	1,03	0,09	0,98
				Масса 1000 зерен	1,02	0,08	0,99
				Урожай зерна	1,09	0,31	0,99
				Количество стеблей	1,02	0,1	0,90
				Высота стеблей	1,07	0,30	0,96
				Длина колоса	1,04	0,13	0,99
				Число зерен в колосе	1,04	0,11	0,98
				Масса 1000 зерен	1,02	0,08	0,99
				Урожай	1,09	0,36	0,97
Рис							
Приморский край, Дальний Восток	3-рядная, продуваемая (тополь, осина, береза)	Тяжело-суглинистые, глинистой разновидности	Рис	Высота растений	1,06	0,28	0,99
				Длина метелки	1,04	0,16	0,96
				Урожай	1,13	0,45	0,90
				Кол-во колосков в метелке	1,06	0,28	0,99
				Кол-во нормально развитых колосков в метелке	1,10	0,45	0,99
				Кол-во зрелых стекловидных зерен	1,19	0,64	0,90
Картофель							
Куйбышевское Заволжье, Кутулукская ОС	ЛП плотные, 11-12 м	Обыкновенный чернозем	Картофель	Число клубней в кусте	1,07	0,45	0,89
				Урожай	0,90	0,48	0,60
				Средний вес всех клубней	0,89	0,48	0,56
Кукуруза							
Ростовская обл., Аксайский р-н, с-з "Заречный"	Система полос с 4 сторон	Предкавказские карбонатные черноземы	Кукуруза	Листовая поверхность	1,07	0,29	0,86
				Урожай зеленой массы	0,96	0,34	0,62

Продолжение табл. 37

1	2	3	4	5	6	7	8
Волгоградская обл., с-з "Поливной", Кисловская и Заволжская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-18 м	Светло-каштановые	Кукуруза ВИР-156 ТВ	Высота стебля	1,02	0,01	0,99
			Кукуруза ВИР-156 ТВ		1,08	0,02	0,95
			Кукуруза YC-183		1,01	0,01	0,75
Волгоградская обл., с-з "Великий Октябрь", Кисловская и Заволжская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-25 м	Светло-каштановые	Кукуруза Днепровский 98 МВ	Высота стебля	0,98	0,01	0,81
Волгоградская обл., с-з "Поливной", Кисловская и Заволжская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-18 м	Светло-каштановые	Кукуруза гибрид Элора	Высота стебля	0,96	0,01	0,83
			Кукуруза гибрид Элора	Высота стебля	0,93	0,01	0,70
			Кукуруза ВИР-156 ТВ	Биомасса сырая	1,00	0,03	0,80
			Кукуруза YC-183	Биомасса сырая	0,92	0,01	0,80
Волгоградская обл., с-з "Великий Октябрь", Кисловская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-25 м	Светло-каштановые	Кукуруза Днепровский 98 МВ	Биомасса сырая	1,09	0,02	0,89
Волгоградская обл., с-з "Поливной", Кисловская и Заволжская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-18 м	Светло-каштановые	Кукуруза гибрид Элора	Биомасса сырая	0,96	0,01	0,64
			Кукуруза ВИР-156 ТВ	Биомасса сухая	0,98	0,04	0,68
			Кукуруза YC-183	Биомасса сухая	1,03	0,04	0,78
Волгоградская обл., с-з "Великий Октябрь", Кисловская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-25 м	Светло-каштановые	Кукуруза Днепровский 98 МВ	Биомасса сухая	1,06	0,08	0,89
Волгоградская обл., с-з "Поливной", Кисловская и Заволжская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-18 м	Светло-каштановые	Кукуруза гибрид Элора	Биомасса сухая	0,60	0,03	0,63
			Кукуруза ВИР-156 ТВ	Ассимилирующая поверхность	0,97	0,02	0,93
					0,98	0,01	0,86
Волгоградская обл., с-з "Великий Октябрь", Кисловская и Заволжская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-25 м	Светло-каштановые	Кукуруза Днепровский 98 МВ	Ассимилирующая поверхность	1,01	0,03	0,97
Волгоградская обл., с-з "Поливной", Кисловская и Заволжская ОС	2-рядные, ажурной конструкции из тополя гибридного, 15-18 м	Светло-каштановые	Кукуруза гибрид Элора	Ассимилирующая поверхность	0,91	0,01	0,59

Окончание табл. 37

1	2	3	4	5	6	7	8
Ячмень							
Нижнее Поволжье, с-з "Великий Октябрь"	ЛП № 99, 2-рядная, тополевая, ажурная, 25 м	Светло-каштановые	Ячмень	Сырая и сухая биомасса	1,06	0,77	0,99
					0,99	1,31	0,88
Нижнее Поволжье, Волгоград, учхоз "Горная Поляна"	5-рядная вязовая, 8-10 м	Каштановые	Ячмень Донецкий-4	Средняя высота стебля	1,00	0,12	0,79
Астраханская обл., Богдинская НИАГЛОС	2-рядная тополевая, 30 м	Пойменные	Ячмень Донецкий-2	Масса 1000 зерен	1,30	1,25	0,88
				Урожай соломы	1,28	1,23	0,89
Озимая пшеница							
Гослесополоса, ОПХ "Качалино"	12-рядная, 8 м (вяз, ясень, дуб, жимолость и т. д.)	Каштановые	Озимая пшеница Дон-85	Высота стеблей	1,03	0,48	0,85
Астраханская обл., Богдинская НИАГЛОС	2-рядная тополевая круговая, 30 м	Пойменные	Озимая пшеница	Кол-во стеблей	0,97	0,13	0,51
				Высота стеблей средн.	1,03	0,27	0,90
				Высота стеблей макс.	1,05	0,33	0,98
				Длина колоса	1,01	0,11	0,76
				Число зерен в колосе	1,00	0,02	0,61
				Масса 1000 зерен	1,00	0,03	0,89
Подсолнечник							
Нижнее Поволжье, ОПХ "Качалино"	5-рядная вязовая со смородиной золотистой	Каштановые	Подсолнечник	Высота стебля	1,04	0,26	0,98
				Диаметр стебля	1,08	0,79	0,95
				Кол-во листьев	1,05	0,28	0,92
				Диаметр корзинки	1,00	0,24	0,80
				Сухая биомассса	0,94	0,35	0,55
Нут							
Нижнее Поволжье, учхоз "Горная Поляна"	5-рядная вязовая, 8-10 м	Каштановые	Нут	Высота главного стебля	0,87	0,29	0,46
				Сырая биомасса	0,76	1,56	0,76

Таблица 38

Нормированная величина биологической продуктивности сельхозкультур

Сельхозкультура	Нормированное расстояние от ЛП											
	0,08	0,1	0,13	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Свекла		1,00	0,9	0,96	0,99		0,88			0,87		0,84
Картофель		1,00		0,88		0,81		0,72			0,64	0,62
Хлопок	1,00	1,00	0,96	0,97	0,94	0,88	0,82	0,82	0,84	0,73		0,74
Чайные кусты	1,00				0,96	0,83		0,83				0,77
Люцерна			1	0,85	0,7	0,68		0,6	0,50	0,46	0,48	0,45
Рис				1,00				0,91				0,75
Кукуруза				1,00	0,87				0,84			0,73
Ячмень		1,00		1,00	0,96	0,91	0,7					0,6
Подсолнечник				1,00	0,88		0,81					0,72
Нут		1,00		0,60	0,55		0,55		0,45			0,44
Яровая пшеница		1,00			1,00		0,95					0,87
Озимая пшеница				1,00	0,95		0,92					0,84

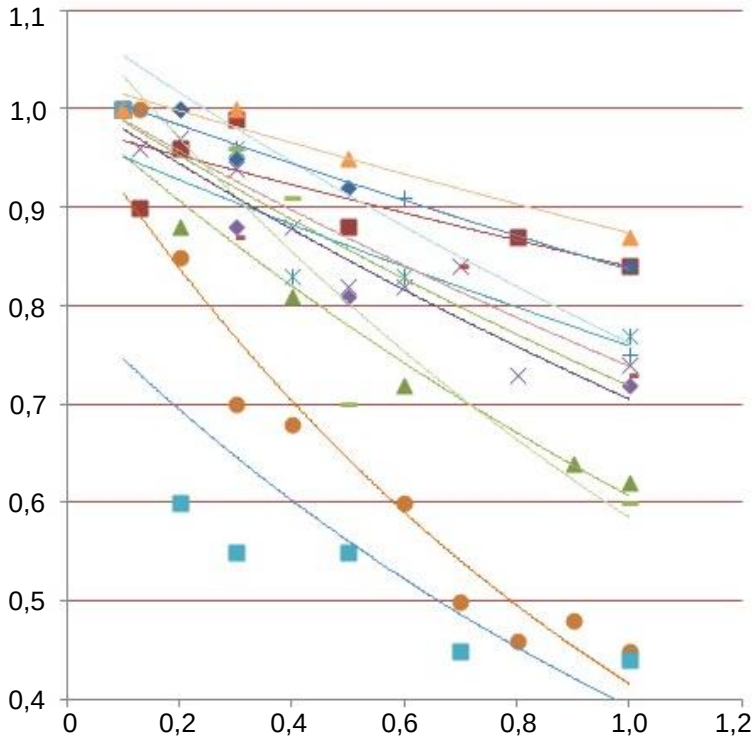

Рис. 18. Зависимость нормированной величины биологической продуктивности сельскохозяйственных культур от расстояния до ЛП: свекла, картофель, хлопок, чайные кусты, люцерна, рис, кукуруза, ячмень, подсолнечник, нут, яровая пшеница, озимая пшеница

ное отклонение во всех случаях, кроме случая с картофелем (0,10 %), ячменем (0,08 %) и подсолнечником (0,15 %), не превышает 0,5 % уровень вероятности, что подтверждает высокую достоверность полученных зависимостей и применимость данного метода к описываемому явлению.

Статистическая оценка подтверждает, что ЛП оказывает влияние на растения под их защитой на протяжении всего периода онтогенеза и полного созревания. Экологическим фактором по Р. Дажо [130] является любой элемент среды, способный оказывать прямое влияние на живые организмы хотя бы на протяжении одной из фаз их индивидуального развития, в т. ч.

Таблица 39

Изменение биопродуктивности сельскохозяйственных культур по экспоненциальной зависимости $y = a \cdot e^{-bx}$

Культура	Параметры уравнения		Коэффициент детерминации R^2
Озимая пшеница	1,02	0,20	0,97
Яровая пшеница	1,03	0,17	0,96
Кукуруза	1,02	0,32	0,86
Ячмень	1,10	0,63	0,88
Подсолнечник	1,02	0,37	0,88
Рис	1,09	0,36	0,96
Нут	0,80	0,71	0,66
Свекла	0,98	0,16	0,65
Картофель	1,00	0,50	0,97
Люцерна	1,00	0,88	0,93
Хлопок	1,02	0,36	0,93
Чайный куст	1,00	0,28	0,82

способствуя появлению адаптивных модификаций. Следовательно, на основе проведенных исследований агроценозов можно сформулировать следующее положение: ЛП являются экологическим фактором, который способствует появлению адаптации у растений агроценоза на межполосной клетке изменяться строго закономерно от расстояния до ЛП по одной зависимости – экспоненциальной. Учитывая ранее сформулированный "закон минимума" Либиха [130] и признавая специфику исследуемого объекта, можно сформулировать следующее положение, или частный закон: ЛП играет роль экологического фактора в зоне влияния, способствуя появлению адаптаций у сельхозкультур и упорядочивая развитие агроценоза изменяться закономерно по экспоненциальной зависимости: $y = a \cdot e^{-bx}$.

При системном исследовании пространственного влияния полезащитных ЛП, опираясь на опыт качественного описания наблюдаемых явлений, используя современные методы количественной интерпретации динамичности самого сообщества и составляющих его элементов, построена феноменологическая модель продукционного процесса сельхозкультур при орошении. Независимо от географического положения района исследований, структуры, рядности, породного состава ЛП, почвы, продуктивность сельхозкультур (зерновых, кормовых, овощных, масличных, технических и т. д.) при орошении изменяется по экспоненциальному закону, что подтверждает нашу гипотезу об оптимальных условиях развития сельхозкультур под влиянием ЛП и орошения. Причем главенствующая роль принадлежит не орошению, а ЛП, которая трансформирует основные климатические факторы и изменяет их на прилегающей территории, т. е. выполняет климаторегулирующую роль, создавая оптимум для сельхозкультур. ЛП выступает в качестве экологического фактора, влияющего на развитие агроценоза, определяя закономерность его развития по экспоненте.

Таблица 40

Статистическая оценка достоверности результатов исследований продуктивности сельхозкультур в межполосном пространстве

Показатель	Культура											
	свекла	картофель	хлопок	чайные кусты	люцерна	рис	кукуруза	ячмень	подсолнечник	нут	пшеница	
											яровая	озимая
Среднее	1,03	0,95	1,03	1,03	1,04	0,99	0,92	1,02	1,13	1,02	1,05	1,01
Стандартная ошибка	0,01	0,06	0,01	0,01	0	0,04	0,04	0,06	0,07	0,02	0,01	0,01
Медиана	1,03	0,90	1,03	1,03	1,04	0,95	0,96	1,02	1,06	1,04	1,04	1,01
Стандартное отклонение	0,03	0,10	0,04	0,04	0,01	0,08	0,09	0,08	0,15	0,05	0,03	0,03
Дисперсия выборки	0	0,01	0	0,00	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0	0	0
Эксцесс	4,41	0,42	0,66	0,66	–0,40	0,03	1,11	0,12	–3,10	0,04	–1,00	–0,54
Асимметричность	–1,95	1,71	0,50	0,50	–0,70	1,68	–1,30	0,47	0,49	–0,64	0,74	–0,33
Интервал	0,09	0,18	0,16	0,16	0,01	0,14	0,24	0,12	0,31	0,14	0,07	0,08
Минимум	0,96	0,89	0,96	0,96	1,03	0,94	0,76	0,96	0,99	0,94	1,02	0,97
Максимум	1,05	1,07	1,12	1,12	1,04	1,08	1,00	1,07	1,30	1,08	1,09	1,05
Сумма	9,24	2,86	14,50	14,46	4,15	2,97	5,54	2,03	5,63	5,11	13,60	7,09
Счет	9,00	3,00	14,00	14,00	4,00	3,00	6,00	2,00	5,00	5,00	13,00	7,00
Уровень надежности (95,0%)	0,02	0,25	0,02	0,02	0,01	0,19	0,10	0,73	0,19	0,07	0,02	0,02

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и обобщение эмпирических данных, известных теоретических положений позволили разработать ряд моделей и методических приемов, определяющих суть биопродуктивности защищенных агролесоландшафтов, особенности развития орошаемых агрофитоценозов, сформулировать закон о роли ЛП как экологического фактора.

Анализ локальных и пространственных функций ЗЛН позволил выявить их сложный характер, детерминированный в экосистемном пространстве межполосной клетки и вероятностный вне зоны влияния насаждений.

Определено место и роль орошения в повышении продуктивности и устойчивости сельскохозяйственного производства и плодородия почв средствами не только мелиорации, но и агролесомелиорации. Выявлена определяющая роль ЛП в биопродукционном процессе и урожайности сельхозкультур.

Разработана теория биопродукционного процесса на основе системного анализа и математического моделирования, позволяющая решать поставленные задачи, минимизировав полевые исследования. Получена новая методика расчета с помощью дифференциальных исчислений и эмпирических данных динамики высоты, биомассы, суточных приростов, ФП, массы 1000 зерен сельхозкультур в орошаемых агролесоландшафтах, на отдельные положения которых уже получены патенты.

Разработаны и зарегистрированы программные продукты способов определения оптимального количества образцов стеблей озимой пшеницы и масличных культур.

Получена модель роста двенадцати сельскохозяйственных культур: свеклы, люцерны, подсолнечника, картофеля, риса, нута, хлопка, кукурузы, яровой и озимой пшеницы, ячменя и чайных кустов – в экосистемном пространстве межполосной клетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление СНК СССР, ЦК ВКП(б) от 26.10.1938 N 1169 "О мерах обеспечения устойчивого урожая в засушливых районах юго-востока СССР (Саратовская, Сталинградская, Куйбышевская, Оренбургская, Западно-Казахстан-ская, Актюбинская области, АССР немцев Поволжья, северо-восточные районы Ворошиловградской области, северные и северо-восточные районы Ростовской области и юго-восточные районы Воронежской и Тамбовской областей)" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:// www.consultant.ru.

2. Экологическая устойчивость и продуктивность орошаемых агролесоландшафтов в Нижнем Поволжье // А. М. Степанов [и др.]. – Волгоград, ВНИАЛМИ, 2008. – 80 с.

3. Постановление ЦК КПСС, Совмина СССР от 23.10.1984 N 1082 "О долговременной программе мелиорации, повышении эффективности использования мелиорированных земель в целях устойчивого наращивания продовольственного фонда страны" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru.

4. Электронный ресурс: http://fermer.ru/news/48691.

5. Электронный ресурс: http://ksh.volganet.ru.

6. Постановление Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717 (ред. от 15.07.2013 г.) "О Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mcx.ru/navigation/ docfeeder/show/342.htm.

7. Будаговский А. И., Росс Ю. К. Основы количественной теории фотосинтетической деятельности посевов // Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности: сб. науч. тр. АН СССР / Под ред. А. А. Ничипоровича. – М.: Наука, 1966. – С. 51-58.

8. Агролесомелиорация и плодородие почв / Е. С. Павловский [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1991. – 288 с.

9. ОСТ 56-108-98 Стандарт отрасли. Лесоводство. Термины и определения. Введен взамен ГОСТ 18486-73. Лесоводство: Термины и определения. – М.: Госкомстандарт, 1973-13 01.01.1999 ВНИИЦ лесресурс ЛР № 020906 от 15.08.94. – С. 45-47.

10. К. Уатт. Экология и управление природными ресурсами. Количественный подход / пер. с англ. А. И. Козленкова. – М.: Мир, 1971. – 460 с.

11. ГОСТ 16265-80. Земледелие. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов. – 1980. – 11 с.

12. Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник. – М.: Мысль, 1990. – 638 с.

13. Биологический энциклопедический словарь / Под ред. М. С. Гиляров. – М.: Изд-во 2-е, 1989. – 863 с.

14. Ничипорович А. А. Вступительная статья // Принципы управления продукционными процессами в агроэкосистемах: сб. ст. Ин-та агрохимии и почвоведения / Под ред. А. А. Ничипоровича. – М.: Наука, 1976. – С. 3-6.

15. Свентицкий И. И. Биоэнергетические аспекты управления продуктивностью агроэкосистем // Там же. – С. 169-179.

16. Багров М. Н., Кружилин И. П. Оросительные системы и их эксплуатация. – М.: Колос, 1971. – 208 с.

17. Мещанинова Н. Б. Агрометеорологическое обоснование орошения зерновых культур. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – С. 65-99.

18. Singh B. N. D. and Singh B. R. M. Growth and Water Requirement of Crop Plant in Relation to Soil Moisture. Proc. Indian Acad. Sci. – Vol. IV. – 1936, November, № 5.

19. Гарюгин Г. А. Режим орошения сельскохозяйственных культур / Под ред. Б. А. Шумакова. – М.: Колос, 1979. – 269 с.

20. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 208 с.

21. Борисов Д. В., Рябов П. Г. Орошение на службе урожая.– Волгоград: Нижн.-Волж. кн. изд-во, 1986. – 47 с.

22. Кузник И. А. Орошение в Заволжье. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 160 с.

23. Kappes K. Klima and Meteorologische Grundlagen. – Berlin: Verlag., 1970. – P. 46-49.

24. Rjdins S., Domingo C. E. Moisture and Nitrogen Effects on Irrigated spring. – Wea. Agron. J., 1962. – Vol. 54. – P. 135-138.

25. Основные вопросы техники поверхностных поливов / И. А. Кузник [и др.] // Тр. Сар. СХИ. – Т. 22. – Саратов: СХИ, 1969. – С. 65-104.

26. Костин И. С. Орошение в Поволжье / Под ред. Б. А. Шумакова. – М.: Колос, 1971. – 224 с.

27. Ландес Г. А., Никольская А. А., Фроликов П. И. Полив дождеванием зерновых культур. – М.: Колос, 1975. – 128 с.

28. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: Справочник / Под ред. Б. Б. Шумакова. – М.: Колос, 1999. – 432 с.

29. Гиляров А. М. Популяционная экология: учеб. пособие. – М.: МГУ, 1990. – 191 с.

30. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 287 с.

31. Росс Ю. К. К теории альбедо растительного покрова // Научные сообщения института геологии и географии АН ЛитССР. – 1962. – № 13. – С. 151-155.

32. De Witt C. T. Photosynthesis of leaf canopies //Agric. Res. Rep. – 1965. –

№ 663. – P. 17-37.

33. Сысуев В. В. Моделирование процессов в ландшафтно-геохимических системах. – М.: Наука, 1986. – 302 с.

34. Жирмунский А. В., Кузьмин В. И. Критические уровни в развитии природных систем. – Л.: Наука, 1990. – 222 с.

35. Вернадский В. И. Биосфера // Изб. соч: в 5 т. – Т. 5. – 1960. – С. 5-102.

36. Физика. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. – Изд. 4-е. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 944 с.

37. Химическая энциклопедия: в 5 т. – Т. 2. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – 1334 с.

38. Inoue E. On the CO_2 – Concentration profiles within Crop Canopies // J. of Agricult. Meterology. – 1965. – Vol. 20. – № 4.

39. Гойса Н. И., Рогаченко А. Д. О методике определения фенометрических и радиационных характеристик посевов кукурузы // Сб. тр. УкрНИГМИ. – 1969. – Вып. 84. – С. 83-93.

40. Рулева О. В. Теоретическо-методологическая оценка влияния лесных полос на биологическую продуктивность сельскохозяйственных культур в орошаемых агролесоландшафтах // Аграрный научный журнал. – 2006. – № 6. – С. 62.

41. Зайцев Г. Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1984. – 288 с.

42. Рулева О. В. Биопродуктивность орошаемых агролесоландшафтов юга Европейской России: автореф. дис. …д. с.-х. н. – Волгоград, 2005. – 48 с.

43. Герасимов Ю. Ю., Хлюстов В. К. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ: применение в лесоуправлении и экологии: уч. для лесных вузов. – М.: МГУЛ, 2001. – 260 с.

44. Лакин Г.Ф. Биометрия: учеб. пособие для биолог. спец. вузов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 352 с.

45. Рулева О. В., Овечко Н. Н. Определение оптимального количества образцов пшеницы по главным стеблям в защищенных агрофитоценозах // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – № 11. – 2016. – 1 с. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016662088.

46. Рулева О. В., Овечко Н. Н. Определение размера малой выборки масличных культур в зоне влияния лесных полос / Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – № 12. – 2016. – 1 с. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016662346.

47. Часовенная А. А. Основы агрофитоценологии // Учеб. пособие. – Л.: ЛГУ, 1975. – 188 с.

48. Алпатьев А. М. Влагооборот культурных растений. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1954. – 248 с.

49. Гойса Н. И., Олейник Р. Н., Рогаченко А. Д. Гидрометеорологический режим и продуктивность орошаемой кукурузы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 230 с.

50. Росс Ю. К., Власова М. П. Биометрическая характеристика и динамика развития посева кукурузы // Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности: сб. науч. тр. АН СССР / Под ред. А. А. Ничипоровича. – М.: Наука, 1966. – С. 78-95.

51. Чирков Ю. И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 251 с.

52. Афанасьев В. Г. Проблемы целостности в философии и биологии. – М.: Мысль, 1964. – 416 с.

53. Адиньяев Э. Д. Возделывание кукурузы при орошении. – М.: Агропромиздат, 1988. – 167 с.

54. Гибриды кукурузы. Реклама. – Киев: Минсельхоз СССР, НПО Днепр, 1984. – 4 с.

55. Пионер Оверсия / Проспект по кукурузе фирмы "Pioneer". – ГЕЗ. М. Б. Х, А-71 Н Пандорф, Австрия.

56. Володарский Н. И. Биологические основы возделывания кукурузы. – М.: Колос, 1975. – 256 с.

57. Рубин Б. А. Курс физиологии растений. – М.: Высшая школа, 1963. – 598 с.

58. Рулева О. В. Математический анализ агроценозов на орошаемых землях в системе лесных полос // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2001. – № 3. – С. 28-31.

59. Климов А. А., Листопад Г. Е., Устенко Г. П. Программирование урожая / Под ред. А. А. Климова. – Волгоград, 1975. – Т. V. – 367 с.

60. Патент № 2603903. Рулева О. В., Овечко Н. Н. Способ расчета биомассы растений в межполосном пространстве.

61. Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь. – М.: Мысль, 1990. – 638 с.

62. Ничипорович А. А. Задачи работ по изучению фотосинтетической деятельности растений как фактора продуктивности // Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности: сб. науч. тр. АН СССР / Под ред. А. А. Ничипоровича. – М.: Наука, 1966. – С. 7-50.

63. Берлянд Т. Г. Распределение солнечной радиации на континентах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 226 с.

64. Рулев А. С. Ландшафтно-географический подход в агролесомелиорации. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2007. – 160 с.

65. Рулева О. В., Рулев А. С. Геопространственная парадигма в управлении биопродуктивностью агролесоландшафтов // Научная жизнь. – 2015. – № 6. – С. 68-77.

66. Тооминг Х. Г. Дневные и сезонные изменения альбедо некоторых естественных поверхностей Эстонской ССР // Исследования по физике атмосферы. – 1960. – Вып. 2. – С. 115-163.

67. Березина Л. С. Альбедо некоторых сельскохозяйственных культур // Тр. УкрНИГМИ. – 1957. – Вып. 8. – С. 93-100.

68. Гальперин Б. М. Альбедо сельскохозяйственных угодий // Соц. зер-

новое хозяйство. – 1938. – № 5. – С. 179-192.

69. Русин Н. П. Радиационный баланс поля, засеянного зерновыми культурами // Труды ГГО. – 1958. – Вып. 77. – С. 43-56.

70. Жуковский П. М. Мировой генофонд растений для селекции. Мегагенцентры и эндемичные микрогенцентры. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 88 с.

71. Марков М. В. Агрофитоценология. – Казань: Казанский ун-т, 1972. – 268 с.

72. Braun-Blangnet J. 1928. Pflanzensoziologie Grundzüge der Vegetationskunde: Erste Anflage. – Berlin, 1928. Zweite Auflage. – Wien, 1951. Dritte, neubearbeitete und Wesentlich vermehrte Auflage. – Wiene, New-York, 1964.

73. Суворов В. В., Воронова И. Н. Ботаника с основами геоботаники: учебник для вузов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: ТИД "АРИС", 2013. – 520 с.

74. Weber R. Ruderalpflanzen und ihre Gesellschaften. Die neue Brehm-Bucherei. – Wittenberg-Lutherstadt, 1961. – 164 S.

75. Хржановский В. Г., Пономаренко С. Ф. Ботаника. – М.: Колос, 1982. – 482 с.

76. Талиев В. И. Определитель высших растений Европейской части СССР. – Изд. 8-е. – М.: Сельхозгиз, 1935. – 643 с.

77. Рулева О. В., Овечко Н. Н. История развития мелиорации и агролесомелиорации Нижнего Поволжья в перспективе повышения продуктивности и устойчивости пахотных земель // Мелиорация и водное хозяйство: проблемы и пути решения: материалы Международ. науч. конф. – М.: ВНИИА, 2016. – Т. I. – 462 с.

78. Лабазников Б. В. Экологическая среда лесозащитных полей и ее влияние на онтогенез сельскохозяйственных культур на орошаемых и неорошаемых землях Кавказа // Агролесомелиоративные насаждения, их экология и значение в лесоаграрном ландшафте: сб. научн. тр. / Под ред. Е. С. Павловского. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1983. – С. 99-108.

79. Степанов А. М., Васильчиков В. Е. Полезащитные лесные полосы на орошаемых землях. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 46 с.

80. Годунова Н. Ю., Ковалева О. В. Формирование качества урожая сельскохозяйственных культур в системах лесных полос при орошении дождеванием // Современные вопросы полезащитного лесоразведения: сб. науч. тр. / Под ред. А. М. Степанова. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 1988. – С. 132-139.

81. Рулева О. В. Анализ структуры урожая в зоне влияния лесных полос // Зерновое хозяйство. – 2003. – № 5. – С. 20-21.

82. Росс Ю. К. Математическое моделирование фотосинтетической продуктивности растений // Вестник АН СССР. – 1972. – № 12. – С. 99-104.

83. Кумаков В. А. Направление селекционной работы с целью улучшения показателей фотосинтетической деятельности растений // Важнейшие проблемы фотосинтеза в растениеводстве: тр. ВАСХНИЛ. – М.: Колос, 1970. – С. 206-220.

84. Рулева О. В., Овечко Н. Н. Роль фотосинтетического потенциала при выявлении закономерностей функционирования биопродуктивности

агробиоценозов // Российская сельскохозяйственная наука. – 2016. – № 6. – С. 28-31.

85. Рулева О. В. Прогноз развития сельскохозяйственных культур в зоне влияния защитных лесных насаждений // Кормопроизводство. – 2004. – № 3. – С. 14-15.

86. Конарев В. Г., Курамшин Г. С., Хангильдин В. Х. Формирование урожая различных сортов и гибридов кукурузы в условиях степной зоны Башкирской АССР // Биохимия и физиология формирования урожая кукурузы: сб. науч. тр. – Уфа: Ин-т биологии АН СССР, 1960.

87. Карузин Б. В. Лесные полосы и урожай в Заволжье. – Куйбышев: Куйбышевское обл. изд-во, 1954. – 54 с.

88. Коданев И. М. Повышение качества зерна. – М.: Колос, 1976. – 304 с.

89. Физиология сельскохозяйственных растений: в 12 т. / Под ред. Б. А. Рубина. – Т. VI. Зернобобовые растения. Многолетние травы. Хлебные злаки (рожь, ячмень, овес, просо и гречиха). – М.: МГУ, 1970. – 653 с.

90. Даньшин Т. Е. Морфогенез растений. – М.: МГУ, 1961. – 130 с.

91. Бахтеев Ф. Х. Ячмень. – М. – Л.: Сельхозгиз, 1955. – 48 с.

92. Борисоник С. Г. Ячмень и овес в черноземной зоне. – М.: Сельхозгиз, 1957. – 164 с.

93. Коданев И. М. Ячмень. – М.: Колос, 1964. – 36 с.

94. Основы агрономии / Г. В. Бадина [и др.]. – Л.: Агропромиздат, 1988. – 448 с.

95. Керефов К. Н. Биологические основы растениеводства. – М.: Высшая школа, 1975. – 421 с.

96. Гойса Н. И., Олейник Р. Н., Рогаченко А. Д. Гидрометеорологический режим и продуктивность орошаемой кукурузы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 230 с.

97. Бетс К. Лесные полосы и их значение в сельском хозяйстве / пер. с англ. под ред. Н. И. Сус. – М.: б. и., 1930. – 80 с.

98. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 338 с.

99. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирования урожая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 199 с.

100. Арманд А. Д., Дроздов А. В. О физическом и информационном подходах к моделированию экосистем на примере лесостепи / Материалы сов.-амер. симпозиумов по биосферным заповедникам: докл. сов. участн. – М.: Наука, 1976. – Ч. 1/2. – С. 29-39.

101. Физиология сельскохозяйственных растений: в 12 т. / Под ред. Б. А. Рубина. – Т. V: Физиология кукурузы и риса. – М.: МГУ, 1969. – 414 с.

102. Шиголев А. А. Температура как количественный агрометеорологический показатель скорости развития растений и некоторых элементов их продуктивности // Тр. ЦНП, 1957. – Вып. 53. – С. 75-82.

103. Хрушка Я. Монография о кукурузе / пер. с чеш. М. П. Умного. – М.: Колос, 1965. – 751 с.

104. Володарский Н. И. Биологические основы возделывания кукурузы. – М.: Колос, 1975. – 256 с.

105. Руководство по возделыванию кукурузы на зерно / В. В. Мелихов [и др.]. – Волгоград: Издатель, 2003. – 88 с.

106. Гродзинский А. М., Гродзинский Д. М. Краткий справочник по физиологии растений. – М.: Научная мысль, 1973. – 590 с.

107. Остапов В. И., Дударь Н. К. Кукуруза на орошаемых землях. – Киев: Урожай, 1979. – 102 с.

108. Тепловой и водный режим Украины / А. Р. Константинов [и др.]. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 591 с.

109. Ржанова Е. И., Ахундова В. А., Шлейфер С. В. Морфогенез растений. – М.: МГУ, 1961. – 123 с.

110. Ильин М. М. Флора СССР. – Т. IV. – М.: АН СССР, 1936. – 396 с.

111. Ulbrix E. Die natürliche Pflanzen. – Berlin: 1934. – 101 S.

112. Орловский Н. И. Основы биологии сахарной свеклы. – Киев: Наукова думка, 1952. – 56 с.

113. Физиология сельскохозяйственных растений: в 12 т. / Под ред. Б. А. Рубина. – Т. VII: Физиология сахарной свеклы. – М.: МГУ, 1968. – 426 с.

114. Ярошевский П. Е. Научно-производственные записи по свекловичному производству. – Киев: 1939. – 120 с.

115. Задлер В. В. Качество семян сахарной свеклы как фактор урожайности. – Киев: Наукова думка, 1952. – 68 с.

116. Кружилин А. С. Биологические особенности и продуктивность орошаемых культур. – М.: Колос, 1972. – 304 с.

117. Максимович А. Е. Свекловодство. – Киев: Наукова думка, 1940. – 138 с.

118. Физиология сельскохозяйственных растений: в 12 т. / Под ред. Б. А. Рубина. – Т. XII: Физиология картофеля и корнеплодов. – М.: МГУ, 1971. – 371 с.

119. Успенский Е. М. Картофель. – М.: Сельхозгиз, 1937. –103 с.

120. Buschnell J. Potato // Americ. J. – N 7. – 1956.

121. Засухи СССР, их происхождение и влияние на урожай: сб. материалов / Под ред. А. И. Руденко. – М.: Гидрометеоиздат, 1958. – 207 с.

122. Ляпунов А. А. В чем состоит системный подход к изучению реальных объектов сложной природы // Управляемые системы: сб. тр. Новосибирского ин-та математики. – Новосибирск: Наука, 1970. – Вып. 6. – С. 44-56.

123. Розенберг Г. С. Модели в фитоценологии. – М.: Наука, 1984. – 264 с.

124. Губанов В. А., Захаров В. В., Коваленко А. Н. Введение в системный анализ: Учеб. пособие. – Л.: ЛГУ, 1988. – 232 с.

125. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.

126. Салугин А. Н. Введение в системный анализ. Компьютерные основы принятия решений: Учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГАСА, 2002. – 107 с.

127. Лабазников Б. В. Лесные полосы и урожайность сельскохозяйст-

венных культур на орошаемых землях в СССР. – М.:ВИНТИСХ МСХ СССР, 1969. – 86 с.

128. Константинов А. Р., Струзер Л. Р. Лесные полосы и урожай. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 213 с.

129. Рулева О. В. Модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур в орошаемых агролесоландшафтах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2014. – № 3(35). – С. 62-68.

130. Дажо Р. Основы экологии / пер. с фр. В. И. Назарова / Под ред. проф. В. В. Ал-патова. – М.: Прогресс, 1975. – 415 с.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662088

Определение оптимального количества образцов пшеницы по главным стеблям в защищенных агрофитоценозах

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (RU)***

Авторы: ***Рулева Ольга Васильевна (RU),***
Овечко Наталья Николаевна (RU)

Заявка № **2016619675**
Дата поступления **14 сентября 2016 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***31 октября 2016 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662346

Определение размера малой выборки масличных культур в зоне влияния лесных полос

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (RU)***

Авторы: ***Рулева Ольга Васильевна (RU),***
Овечко Наталья Николаевна (RU)

Заявка № **2016619724**
Дата поступления **14 сентября 2016 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***08 ноября 2016 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2603903

СПОСОБ РАСЧЕТА БИОМАССЫ РАСТЕНИЙ В МЕЖПОЛОСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук" (ФНЦ агроэкологии РАН) (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2015139780**

Приоритет изобретения **18 сентября 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***09 ноября 2016 г.***

Срок действия патента истекает **18 сентября 2035 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение..... 3
1. **Из истории развития мелиоративной науки**..... 4
1.1. Этапы становления агролесомелиорации..... 4
1.2. Агролесомелиоративное обустройство территории Нижнего Поволжья..... 6
2. **Теоретические аспекты продукционного процесса агроценозов**... 10
2.1. Мелиоративные особенности агроценозов..... 12
2.2. Общие вопросы математического моделирования агролесосистем 15
3. **Методология и методика исследований биопродуктивности агробиоценозов**..... 21
3.1. Методика отбора образцов сельскохозяйственных культур по малой выборке..... 22
3.2. Методика определения динамики и биометрических параметров растений..... 26
4. **Математические модели развития сельскохозяйственных культур в орошаемых лесоландшафтах**..... 31
4.1. Динамика высоты сельскохозяйственных культур..... 31
4.2. Динамика биомассы сельскохозяйственных культур..... 39
4.3. Ассимилирующая поверхность и фотосинтетический потенциал сельскохозяйственных культур..... 56
4.4. Значение альбедо деятельной поверхности при формировании биопродуктивности..... 59
4.5. Экологическая особенность структурной организации биопродуктивности агрофитоценозов..... 64
5. **Динамика качественных показателей структуры урожая**..... 71
5.1. Изменение структуры урожая..... 71
5.2. Качественные характеристики биомассы и зерна..... 76
6. **Прогнозная модель продукционного процесса орошаемых сельскохозяйственных культур**..... 82
6.1. Эколого-биологические особенности развития сельскохозяйственных культур..... 82
6.2. Модель продукционного процесса..... 92
Заключение..... 102
Литература..... 103
Приложения..... 109

О. В. Рулева, Н. Н. Овечко

БИОПРОДУКТИВНОСТЬ ОРОШАЕМЫХ АГРОЛЕСОЛАНДШАФТОВ: МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

Редактор **Т. Е. Крохта**
Компьютерная верстка **В. Г. Гирявенко**
Ответственный за выпуск **С. А. Корпушов**

Подписано в печать 12.10.17.
Объем 8,5 уч.-изд. л. Формат 60х84/16.
Тираж 500 (первый завод 200). Заказ 8.

400062, Волгоград, Университетский проспект, 97.
Копировально-множительное бюро ФНЦ агроэкологии РАН.