

На правах рукописи



КОРСАКОВА СВЕТЛАНА ПАВЛОВНА

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕАКЦИИ РАСТЕНИЙ
НА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

03.02.08 – экология (биологические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Ялта – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»

Научный консультант: доктор сельскохозяйственных наук,
член-корреспондент РАН
Плугатарь Юрий Владимирович

Официальные оппоненты: **Рындин Алексей Владимирович**
доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт
цветоводства и субтропических культур», директор, главный
научный сотрудник опытно-технологического отдела

Розенберг Геннадий Самуилович

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент
РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт экологии Волжского бассейна Российской
академии наук», главный научный сотрудник лаборатории
моделирования и управления экосистемами

Сиземская Марина Львовна

доктор биологических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт лесоведения Российской академии наук»,
заведующая лабораторией аридного лесоразведения

Ведущая организация: Институт леса – обособленное подразделение Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра «Карельский
научный центр Российской академии наук»

Защита состоится «23» мая 2019 г. в 10⁰⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д 900.011.01, ФГБУН «Ордена
Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный
научный центр РАН» по адресу: 298648, Российская Федерация, Республика
Крым, г. Ялта, пгт. Никита, спуск Никитский, 52, e-mail: dissovet.nbs@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН
«Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад –
Национальный научный центр РАН» по адресу: 298648, Российская Федерация,
Республика Крым, г. Ялта, пгт. Никита, спуск Никитский, 52, адрес сайта
<http://nbgnsipro.com>

Автореферат разослан «___» февраля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Корженевская Юлия Владиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Прогнозирование реакции растений на возможные климатические изменения является одной из наиболее насущных проблем современной экологии (Карпухина, 2007; Жмылева, 2011; Минин, 2016; Chuine, 2003; Menzel, 2006; Sherry, 2007; Siljamo, 2008; Primack, 2009). Особого внимания требуют многолетние растения, которые ведут прикрепленный к субстрату образ жизни и не могут мигрировать достаточно быстро вслед за изменением их климатической ниши (Savolainen, 2007; Delzon, 2013). Особенности природных условий Южного берега Крыма (ЮБК) в период активной вегетации растений проявляются, прежде всего, дефицитом осадков на фоне высоких летних температур. Засуха, вызывающая в летние месяцы у растений температурный и водный стресс, является на Южнобережье главным лимитирующим фактором для функционирования как природных, так и культурных фитоценозов. В связи с вероятностью климатогенной аридизации, изучение реакции на изменение климата элементов флоры средиземноморских ландшафтов, находящихся на границе ареала своего существования, особенно актуально (Дидух, 1992; Гаркуша, 2012; Шеляг-Сосонко, 1998; Гордеев, 2008; Боков, 2010б; Chen, 2017). При создании устойчивых культурфитоценозов комплексное исследование ответных реакций растений на водный дефицит имеет решающее значение для выяснения механизмов адаптации и устойчивости видов и культиваров к стресс-факторам среды.

В последние десятилетия сформировалась и активно развивается современная технология анализа, моделирования и принятия решений на платформе электронных таблиц (Шадрина, 2016; Powell, 2004), однако ее возможности используются недостаточно эффективно.

Степень разработанности темы. В качестве основного инструмента, связывающего сезонную динамику развития растений с климатическими факторами, применяются фенологические модели (Гордеев, 2006; Ruml, 2005). В настоящее время за рубежом ведутся активные исследования по улучшению точности прогноза фенологических реакций растений на будущие климатические условия. Несмотря на разнообразие моделей, в странах СНГ используются, как правило, только простейшие фенологические модели, основанные на накоплении тепловых единиц (Горышина, 1979; Шульц, 1981; Культиасов, 1982) и описывающие реакцию растений на изменения климата в последние десятилетия (Овчинникова, 2011; Минин, 2016; Одинцова, 2017). Существуют работы по прогнозу ожидаемых изменений в XXI столетии в лесном покрове России (Замолодчиков, 2016; Tchebakova, 2012), растительности криолитозоны России (Анисимов, 2017), встречаются по отдельным видам растений (Парфенова, 2017).

До сих пор недостаточно изучена реакция биоты на климатические изменения в субтропиках (Chen, 2017). Имеются немногочисленные работы по вечнозеленым растениям (Chuine, 1999) и единичные – для эфиромасличных культур (Савчук, 2006; Корсакова, 2012).

Работы, посвященные будущему изменению климата Крыма, содержат обобщенные оценки изменения температуры и осадков для всей территории полуострова, без детализации для отдельных климатических зон (Башарин, 2013; Ефимов, 2015; Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

[электронный ресурс], режим доступа <http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>).

В Крыму перспективная оценка изменений экологической характеристики местообитаний ценопопуляций видов растений не проводилась. Однако данные исследования имеют большое значение, позволяющее оценить и спрогнозировать возможные темпы трансформации растительности и сукцессионные перестройки фитоценозов, а также разработать рекомендации по их сохранению и рациональному природопользованию.

Результаты оценки эколого-физиологических параметров различных видов растений при помощи методологии и приборной базы фитомониторинга позволят дифференцировать виды по особенностям их водного режима, засухоустойчивости, теневыносливости, рекомендовать агротехнические приемы для их выращивания с учетом климатических условий конкретного региона России.

В южных регионах России культивирование новых перспективных сортов представителей рода *Thymus* L. позволит расширить ассортимент ценных эфиромасличных культур и будет способствовать импортозамещению эфиромасличной продукции, востребованной рядом отраслей Российской Федерации, что представляет значительный научный и практический интерес. Комплексных исследований экологической реакции тимьянов на факторы среды не проводилось, а имеющиеся в литературе сведения по их биологии и биохимии ограничены (Гаджиева, 1987; Банаева, 1999; Hudaib, 2002; Cutillas, 2018).

Цель работы – на основе системного подхода выявить реакции видов растений природных и искусственных фитоценозов на изменения абиотических факторов среды, разработать методологические основы экологической оценки и прогноза адаптации компонентов экосистем к климатическим изменениям (на примере Южного берега Крыма).

Задачи исследования:

- выявить особенности воздействий глобального потепления на природно-антропогенные комплексы ЮБК на основе ретроспективного анализа изменений гидротермических условий региона и перспективной оценки на основе климатических моделей проекта СМIP5;
- дать экологическую характеристику местообитаний аборигенных модельных видов растений в составе лесных фитоценозов ЮБК в условиях изменения климата;
- изучить динамику сроков наступления весенних фенофаз модельных видов растений природных и искусственных фитоценозов ЮБК;
- разработать методику построения прогнозных фенологических моделей;
- выполнить оценку и прогноз фенологической реакции модельных видов растений на ожидаемый рост температур в осенне-зимне-весенние месяцы;
- выявить информативно значимые параметры для эколого-физиологической паспортизации интродуцентов на основе оценки толерантности видов к абиотическим факторам среды и анализа их экологических предпочтений;
- разработать методологические подходы по оптимизации интродукции и селекции новых перспективных эфиромасличных растений в условиях изменения климата с использованием численных методов моделирования (на примере

представителей рода *Thymus* L.).

Научная новизна. Впервые выполнен ретроспективный анализ изменений гидротермических условий Южного берега Крыма в эколого-мониторинговом аспекте, выявлено наличие единых пространственно-временных закономерностей формирования климата на территории ЮБК, что значительно упрощает задачу изучения, моделирования, реконструкции недостающих данных, прогнозирования климатических изменений и их воздействий на природно-антропогенные комплексы региона.

Выявлены тенденции трансформации условий местообитаний семи аборигенных модельных видов растений в составе лесных фитоценозов ЮБК (*Quercus pubescens* Willd., *Juniperus excelsa* M.Bieb., *Juniperus deltoides* R. P. Adams, *Arbutus andrachne* L., *Cornus mas* L., *Carpinus orientalis* Mill., *Sorbus domestica* L.) и определены величины смещения их экологических оптимумов, произошедшие в результате современного потепления климата и ожидаемые в XXI столетии.

Проведен сопряженный анализ климатических и фенологических многолетних рядов по схеме «воздействие – отклик», установлены корреляционные связи между изменчивостью сезонной ритмики растений и температурами зимне-весенних месяцев, выявлены общие и частные закономерности реакции модельных видов растений на изменения погоды у растений, отличающихся началом активной вегетации.

На примере простых и комбинированных фенологических моделей наступления весенних фаз развития растений впервые разработана доступная для широкого использования специалистами различных отраслей универсальная методика построения связей между развитием процессов в живой природе и метеоданными с использованием электронно-табличного моделирования и оптимизации на платформе Microsoft Excel для внедрения в практику.

Построены математические модели весенней фенологии для 12 модельных видов растений, произрастающих в природных и искусственных фитоценозах ЮБК, осуществлен прогноз их фенологической реакции на ожидаемый рост температур в осенне-зимне-весенние месяцы в зависимости от климатического сценария. Впервые построена проекция согласованных изменений климата и весенней фенологии *Quercus pubescens* на 2021–2099 гг. На базе использования моделей получены количественные оценки возможной реакции растений на прогнозируемые изменения климатических условий.

На примере изучения вечнозеленых интродуцентов разработан альтернативный подход при подборе лучшей для экспериментальных данных модели световой кривой фотосинтеза, ее оценке и интерпретации результатов. Показана высокая степень адекватности модифицированных моделей прямоугольной и непрямоугольной гиперболы при описании реальной зависимости скорости фотосинтеза от интенсивности света. Предложены 13 наиболее информативных параметров для эколого-физиологической паспортизации интродуцентов, позволяющие дать количественную оценку толерантности видов к абиотическим факторам среды, провести анализ их экологических предпочтений.

Расширены представления о биологии, экологии и биохимии видов рода *Thymus* L., механизмах адаптаций растений к изменяющимся условиям среды

обитания. Полученные данные позволяют определить перспективы введения новых видов в культуру.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основании экспериментальных подходов и разработанных моделей получены новые представления, результаты и выводы, позволяющие расширить спектр современных знаний о процессах взаимодействия растений и климатической системы в прошлом, настоящем и будущем.

Разработанный комплекс экологических математических моделей может найти широкое применение для решения различных теоретических и прикладных задач экологии, интродукции, селекции, лесоведения. В частности, фенологические модели могут быть использованы для оценки и прогнозирования реакции живых организмов на изменение абиотических факторов.

Пространственные прогнозы экологических условий местообитаний растений могут служить основой для моделирования потенциальных ареалов и экотопических ограничений для отдельных видов на региональном и локальном уровнях при прогнозируемых изменениях климата, разработке мероприятий по оптимизации ландшафтов.

Разработанная «Методика агрометеорологических наблюдений за чабрецом обыкновенным» внедрена на сети станций и постов Росгидромета. В Реестр селекционных достижений РФ введены два новых сорта *Thymus*: Светлячок (2015 г.) и Юбилейный (2018 г.). Передан на Госсортоиспытание сорт тимьяна Ялос (2018 г.). С 2017 г. в Крыму на площади 450 м² начата закладка промышленных насаждений сортов *Thymus*: Юбилейный и Ялос, к 2019 г. планируется высадка 10 тыс. растений данных культур на 5 тыс. м², что позволит ускорить процесс импортозамещения эфиромасличной продукции и возрождение эфиромасличной отрасли в России в целом.

Результаты исследований включены в учебный процесс при преподавании спецкурсов «Биологические основы устойчивости зеленых насаждений», «Физиология растений», «Интродукция и селекция декоративных культур» на кафедре садово-паркового хозяйства и ландшафтного проектирования ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского».

Методология и методы исследований. Методология базировалась на системном подходе в теоретико-экспериментальных исследованиях взаимодействия между растениями и окружающей средой. Использованы статистические методы анализа данных, математическое моделирование, численные методы оптимизации (линейного и нелинейного программирования); методы и инструменты климатического моделирования. Применены биоэкологические и экофизиологические методы исследования растений, фенологические и агрометеорологические наблюдения, методы фитомониторинга измерения параметров внешней среды и жизненного состояния растений, газожидкостной хроматографии, вегетационно-полевого опыта. Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета программ (Microsoft Excel 2010, Statistica10).

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленные высокие корреляционные связи в формировании климата на территории ЮБК позволяют реконструировать, моделировать и прогнозировать

воздействие климатических изменений на компоненты природных и искусственно созданных фитоценозов.

2. Разработанная методика электронно-табличного моделирования и оптимизации с использованием генетических алгоритмов позволяет получать адекватные и достаточно точные модели для прогнозирования фенологической реакции растений на погодно-климатические изменения и может быть рекомендована для внедрения в практику экологического прогнозирования.

3. Разработанная методика подбора параметров и базовых шкал для эколого-физиологической паспортизации древесно-кустарниковых интродуцентов на примере *Nerium oleander* позволяет выявить наиболее важные информативные экологические и физиологические показатели, отражающие механизм адаптации растений к основным лимитирующим факторам зоны произрастания и может применяться в селекционной работе и интродукции растений.

4. Построенная комплексная модель эколого-генетического контроля биосинтеза тимола в эфирном масле *Thymus* L. дает возможность прогнозировать уровень его накопления в определенные периоды вегетации разных генотипов для любых сочетаний лимитирующих факторов среды, а также определять зоны оптимума температуры воздуха и условий увлажнения, обеспечивающих максимальное содержание тимола в период сбора сырья.

Степень достоверности. Достоверность результатов и обоснованность научных положений подтверждены большим массивом проанализированных данных полевых и лабораторных исследований, репрезентативностью выборки, применением современных статистических методов анализа, программного обеспечения и критериев оценки.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на 24 международных научных и научно-практических конференциях: «Проблемы дендрологии, цветоводства, плодородства, виноградарства и виноделия» (Ялта, 1996 г.), «Проблемы дендрологии, цветоводства, плодородства» (Ялта, 1997 г.), «Современные проблемы исследования и развития садоводства, субтропических растений и цветов» (Сочи, 1999 г.), «Изучение онтогенеза растений природных и культурных флор в ботанических учреждениях и дендропарках Евразии» (Полтава, 2000 г.), «VII международная конференция ботаников в Санкт-Петербурге» (Санкт-Петербург, 2000 г.), «Современные научные исследования в садоводстве» (Ялта, 2000 г.), «Обмен опытом гидрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства Украины в современных условиях» (Ялта, 2001 г.), «Интродукция и селекция ароматических и лекарственных растений» (Ялта, 2009 г.), «INTROMET 2009» (New Delhi, Индия, 2009 г.), «VI открытый съезд фитобиологов Причерноморья» (Херсон, 2015 г.), «Роль ботанических садов в сохранении и мониторинге биоразнообразия» (Ростов-на-Дону, 2015 г.), «Биотехнология как инструмент сохранения биоразнообразия растительного мира (физиолого-биохимические, эмбриологические, генетические и правовые аспекты)» (Ялта, 2016 г.), «Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 25-летию юбилею биосферного резервата ЮНЕСКО «Национальный парк «Водлозерский» (Петрозаводск, 2016 г.), «Современные технологии в изучении биоразнообразия и интродукции растений» (Ростов-на-Дону, 2017 г.), «Биоразнообразие: подходы к

изучению и сохранению» (Тверь, 2017 г.), «Проблемы и перспективы развития современной ландшафтной архитектуры» (Симферополь, 2017 г.), «Эколого-генетические резервы селекции, семеноводства и размножения растений» (Ялта, 2017 г.), «Экология и география растений и растительных сообществ» (Екатеринбург, 2018 г.), «Сохранение биологического разнообразия и заповедное дело в Крыму» (Ялта, 2018 г.), «Современные задачи и актуальные вопросы лесоведения, дендрологии, парковедения и ландшафтной архитектуры» (Ялта, 2018 г.), «15 International Symposium on Ornamental Horticulture» (Istanbul–Turkey, Турция, 2018), «16 International Symposium on Tropical and Subtropical Vegetable Production: Present and Future Global Biotic and Abiotic Stressors» (Istanbul–Turkey, Турция, 2018), «Ароматические и лекарственные растения: интродукция, селекция, агротехника, биологически активные вещества, влияние на человека» (Ялта, 2018 г.), «Инновационные технологии в области генетики, селекции, семеноводства и размножения растений» (Ялта, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 76 научных работ, в том числе три монографии, одни методические рекомендации и 18 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад соискателя. Разработка методологии моделирования и прогнозирования реакции растений на изменения климата, планирование и проведение комплексных полевых и лабораторных исследований, анализ научной литературы, сбор и статистическая обработка материала, его теоретическая интерпретация, обобщение результатов проведенных исследований, разработка и внедрение методов эколого-биологической оценки растений для использования в интродукции и сельском хозяйстве, разработка шаблонов фенологических моделей в среде MS Excel.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 разделов, заключения, практических рекомендаций, списка литературы и приложений; изложена на 417 страницах, проиллюстрирована 84 рисунками, 117 таблицами и разделена на два тома. Первый том – основная часть, изложена на 353 страницах, список литературы включает 595 источников, в том числе 245 иностранных, 10 ссылок на Интернет-ресурсы. Приложения оформлены отдельным томом объемом 64 страницы, который содержит 46 таблиц и 14 рисунков.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному консультанту, доктору сельскохозяйственных наук, чл.-корреспонденту РАН, Ю.В. Плугатарю, доктору сельскохозяйственных наук Н.Е. Опанасенко, докторам биологических наук О.А. Ильницкому, В.В. Корженевскому, Н.А. Багриковой, кандидату биологических наук Т.Б. Губановой, а также В.В. Антюфееву за советы и ценные замечания при подготовке диссертации.

Работа частично поддержана грантом РНФ № 14-50-00079.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И РЕАКЦИИ НА НИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В обзоре научной литературы рассмотрены современные подходы для перспективной оценки изменения климата при различных сценариях накопления парниковых газов и других атмосферных примесей (RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 и RCP2.6), используемых в климатических моделях пятой фазы международного

проекта сравнения объединенных моделей (CMIP5) (Дымников, 2012; Анисимов, 2013; Кокорев, 2015; Доклад о климатических рисках..., 2017; Riahi, 2011; van Vuuren, 2011; IPCC, 2013; Nazarenko, 2015), обобщены сведения относительно оценок угроз изменения климата для экосистем и биоразнообразия Крыма (Дидух, 1992; Шеляг-Сосонко, 1998; Гаркуша, 2012; Коба, 2014), применения экологических шкал для оценки и прогнозирования вероятных изменений экологических условий местообитаний растений (Раменский, 1956; Цыганов, 1983; Работнов, 1995; Ипатов, 1997; Широких, 2008; Дорогова, 2009; Жукова, 2010; Злобин, 2013; Миркин, 2014; Julve, 1998; Guisan, 2000; Austin, 2006; Didukh, 2011). Проанализированы работы отечественных и зарубежных исследователей, посвященные особенностям проявления реакций растений на изменения климата (Лапин, 1967; Булыгин, 1982, 2000; Минин, 2000, 2014, 2016; Соловьев, 2005; Карпухина, 2007; Жмылева, 2009, 2011; Соколов, 2010; Проскуряков, 2015; Николаева, 2015; Аненхонов, 2017; Ahas, 2006; Menzel, 2006; Parmesan, 2007; Sherry, 2007; Primack, 2009; Pearson, 2012; Richardson, 2013; Wolkovich, 2014; Fu, 2015b; Duputié, 2015; Hänninen, 2016; Malyshev, 2018), построению фенологических моделей (Кельчевская, 1971; Гордеев, 2006; Грингоф, 2011; Овчинникова, 2011; Одинцова, 2017; Суховольский, 2017; Cannell, 1983; Murray, 1989, 1994; Hänninen, 1990, 2016; Kramer, 1994; Herms, 2004; Siljamo, 2008; Primack, 2009; Blümel, 2012; Morin, 2014; Chuine, 2016; Olsson, 2017; Chen, 2017), а также адаптивных стратегий растений к воздействию абиотических факторов среды (Бейдеман, 1974; Лархер, 1978; Пьянков, 1993; Никитина, 2000; Прокопьев, 2001; Панкратов, 2002; Рахманкулова, 2003; Пшибытко, 2006; Таран, 2006; Головка, 2008; Кайбеяйнен, 2009; Болондинский, 2014; Сазонова, 2016; Thornley, 1976; Steudle, 1998; Ackerly, 2000; Chaves, 2009; Greer, 2012; Meletiou-Christou, 2017).

РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ, УСЛОВИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований были аборигенные и интродуцированные модельные виды растений различных жизненных форм и экологических групп, произрастающие на Южном берегу Крыма в приморской и средней полосе Южного макросклона Крымских гор и имеющие важное экологическое, созологическое и практическое значение. В работе даны их морфо-биологические и эколого-ценотические особенности, географическое распространение, биотопическое распределение на ЮБК.

Семь древесно-кустарниковых представителей южнобережных субсредиземноморских ландшафтов: *Quercus pubescens* Willd., *Juniperus excelsa* M.Bieb., *Juniperus deltoides* R.P. Adams, *Arbutus andrachne* L., *Carpinus orientalis* Mill., *Cornus mas* L., *Sorbus domestica* L. включены в исследования фенологической реакции аборигенных видов растений на климатические изменения и климатогенных трансформаций некоторых элементов экотопа.

Три индикаторных вида растений, произрастающих в лесах или парках ЮБК: *Syringa vulgaris* L., *Rosa canina* L., *Tilia cordata* Mill. использованы для построения фенологических моделей и оценки тенденций изменений термических условий весны и первой половины лета.

Вечнозеленые интродуценты (*Aucuba japonica* Thunb., *Nerium oleander* L. и *Laurus nobilis* L.) являлись объектами исследования регуляции параметров водного

обмена и фотосинтетической активности листьев при воздействии гидротермического стресса и изменения светового режима.

Комплексный анализ с целью выделения перспективных для введения в культуру растений при проведении физиолого-биохимических исследований и разработке экологических моделей применен на шести рода *Thymus* L.: *Th. vulgaris* L., *Th. mastichina* (L.) L., *Th. pulegioides* L., *Th. striatus* Vahl, *Th. comosus* Neuff. ex Griseb. et Schenk и *Th. nitens* Lamotte.

Исследования проведены с 1995 по 2017 гг. в Никитском ботаническом саду – Национальном научном центре РАН (НБС-ННЦ). Регион исследований охватывает Западный южнобережный субтропический и Западный лесной среднегорный районы южного макросклона Главной гряды Крымских гор (Климатический атлас Крыма, 2000). Первый район занимает узкую приморскую полосу до 200-300 м высоты над уровнем моря (в.н.у.м.) и характеризуется засушливым субтропическим климатом средиземноморского типа с сухим жарким летом и умеренно-теплой влажной зимой. Второй район простирается от 300 до 1200 м в.н.у.м., климат изменяется от полузасушливого в нижней до влажного в верхней части, от умеренно-жаркого до умеренно-прохладного, с очень мягкой и умеренно-мягкой зимой (Важов, 1977; География Крыма, 1995). Средняя годовая температура воздуха в приморской полосе составляет +12...+14 °С, средний из абсолютных минимумов в различных пунктах варьирует от –5 °С до –7 °С, абсолютный – от –12 до –15 °С. На побережье в течение года среднемесячная температура воздуха положительная, в горах с декабря по март – отрицательная (–1...–3 °С). Абсолютный минимум температуры воздуха в среднегорной зоне – от –17 до –21 °С (на плато –26 °С). Продолжительность безморозного периода в приморской части ЮБК составляет 260-280 дней, на высотах 350-500 м н.у.м. – 210-230 дней; в Горной зоне – 155-200 дней (Плугатарь, 2015б). Самые жаркие месяцы – июль-август, среднемесячные температуры +23...+25 °С (максимальные +34...+39 °С), в Горной зоне – +15...+17 °С (максимальные +27...+30 °С). Среднегодовое количество осадков в приморском поясе до высоты 200 м н.у.м. в западной части ЮБК составляет 500-640 мм, в центральной – 680-780 мм, в восточной – 620-730 мм. На высотах 350-500 м н.у.м. в западной, центральной и восточной частях ЮБК – 740-800, 840-930, 620-800 мм соответственно. В теплый период (апрель-октябрь) в приморском поясе осадки обеспечивают 48-65 % потребности растений во влаге, на высотах 350-500 м – 76-89 %. В сочетании с действием высоких летних температур наблюдаются периодические засухи и суховеи (Плугатарь, 2015б). Наиболее распространенные опасные явления: сильные дожди с количеством осадков ≥ 30 мм за период 12 часов и менее, сильные ветры со скоростью ≥ 25 м/с и понижения температуры до –10 °С и ниже (Корсакова, 2014).

Почвенный покров представлен высотной сменой зональных почв, характеризуется мозаичностью, сложностью, местами – контрастностью (Кочкин, 1967; Драган, 2009). Основным типом почв до высоты 400 м н.у.м. являются коричневые ксерофитных субтропических лесов, маломощные, суглинистые (Кочкин, 1967; Драган, 2009; Опанасенко, 2014, 2016). На горных склонах выше 400 м – бурые горные лесные слабо-ненасыщенные и лессированные высотного пояса широколиственных и хвойно-широколиственных лесов (Костенко, 2014). В границах Никитского ботанического сада (НБС), а также природного заповедника «Мыс Мартыан» наиболее распространены коричневые

слабокарбонатные почвы на смешанном делювии известняков, конгломератов, глинистых сланцев и песчаников; темно-коричневые почвы на продуктах выветривания известняков и красно-коричневые на элювии и делювии известняков (Кочкин, 1976; Костенко, 2014; Опанасенко, 2018).

Информационной базой при исследовании климатических изменений являлись многолетние ряды инструментальных наблюдений на метеостанциях ЮБК: Ай-Петри, Ялта, Алушта (1946–2017 гг.) и Никитский сад (1930–2017 гг.). Анализ климатических изменений проведен по методикам А.В. Гордеева (2006, 2008), Г.В. Груза (2012), оценка пространственной однородности изменения температуры – по методике О.А. Анисимова (2013). В качестве климатической нормы принято среднее многолетнее значение рассматриваемой переменной за базовый период 1961–1990 гг. (Доклад об особенностях климата..., 2017; IPCC, 2013). Приведение метеорологических показателей к многолетнему ряду осуществлено по методикам О.А. Дроздова (1957), Н.В. Кобышевой (1978), В.Н. Малинина (2008). Для оценки условий увлажнения использованы коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова-Г.Н. Высоцкого (Иванов, 1954) и индекс сухости М.И. Будыко (Григорьев, 1959). Расчет годового радиационного баланса проведен по данным актинометрических наблюдений и по формуле Э.Г. Коломыц (2003), континентальности климата – по коэффициенту Н.Н. Иванова (Иванов, 1959), трансформации температур воздуха за счет перераспределения рельефом инсоляции – с учетом поправочных коэффициентов, определенных для ЮБК Д.И. Фурса (1986). Определение дат перехода температуры через определенные пределы и подсчет сумм активных температур осуществлено по методикам, принятым в агроклиматологии (Кельцевская, 1971; Константинов, 1983; ГОСТ 17713–89; Грингоф, 2011).

Для оценки будущих температур использованы данные высокого разрешения (Ramirez, 2008, 2010), предоставленные Международным центром по тропическому сельскому хозяйству в рамках исследовательской программы по изменению климата и продовольственной безопасности (CCAFS) (режим доступа: <http://ccafs-climate.org/data/>). В расчетах за исторический период (1980–2005 гг.) применена версия реанализа AgMERRA (Ruane, 2015). Коэффициенты парной корреляции между среднемесячными, годовыми данными реанализа и данными инструментальных наблюдений на метеорологических станциях ЮБК для температуры воздуха находились в пределах 0,78–0,98, для осадков – 0,73–0,95. Были выбраны пять климатических моделей проекта CMIP5, хорошо воспроизводящих тренды температур (среднегодовой, сезонных и сумм выше 0 °C) для территории Крыма (Анисимов, 2013) и показавших различные значения равновесной чувствительности климата (от 2,8 до 4,1 °C) при средней величине по мультимодельному ансамблю CMIP5 – 3,2 °C (Flato, 2013): BCC-CSM1.1 (Xin, 2013), BCC-CSM1.1(m) (Wu, 2014), IPSL-CM5A-LR (Dufresne, 2013), MIROC-ESM-CHEM (Watanabe, 2011) и MPI-ESM-MR (Giorgetta, 2014) и на сайте CCAFS результаты по сценариям RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 доступны до 2099 г. Для проекции климатических изменений применен ансамблевый метод (Dee, 2011). Коррекция данных моделирования выполнена по методике Международного центра по сельскохозяйственным исследованиям в засушливых зонах (режим доступа: http://cac-program.org/files/Manual_on_CC_data_downloading_and_processing_ru.pdf). При расчетах будущих условий увлажнения применены данные, опубликованные на сайте Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) (режим доступа: <http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>).

Для параметризации фенологических моделей использованы суточные данные метеорологических характеристик за 1935–2017 гг., материалы, собранные автором в процессе стационарных исследований (1993–2017 гг.), исходные данные фенологических наблюдений из архивных документов агрометеостанции Никитский сад (1936–1992 гг.) и «Летописей природы» ООПТ «Мыс Мартьян» (1974–2017 гг.), которые были объединены в единую специализированную базу данных, созданную нами на основе табличного процессора MS Excel. Наблюдательные участки расположены в непосредственной близости от метеорологической площадки (менее 400–500 м). Фенологические наблюдения проведены по стандартным методикам (Наставление гидрометеорологическим станциям..., 1985, 2015; Бейдеман, 1974). Модельные объекты среди видов растений в естественных и антропогенных ландшафтах ЮБК выделены по степени их массовости и доступности для наблюдений, репрезентативности многолетних непрерывных рядов фенологических данных (Таблица 1).

Таблица 1 – Годы фенологических наблюдений за модельными видами растений

Вид	Фенологическая фаза	
	Развертывание листьев	Начало массового цветения
<i>Quercus pubescens</i>	1937–2017	1936–2017
<i>Cornus mas</i>	1954–2017	1937–2017
<i>Carpinus orientalis</i>	1957–2017	1947–2017
<i>Sorbus domestica</i>	1965–2017	1946–2017
<i>Juniperus excelsa</i>	–	1974–2017
<i>Juniperus deltoides</i>	–	1974–2017
<i>Arbutus andrachne</i>	–	1936–1962; 1974–2017
<i>Syringa vulgaris</i>	1953–2017	1937–2017
<i>Rosa canina</i>	1954–2017	1947–2017
<i>Tilia cordata</i>	1953–2017	1937–2017
–	Летне-осеннее, весеннее отрастание, бутонизация, цветение	
<i>Thymus mastichina</i>	1980–2010	
<i>Thymus vulgaris</i>	1970–2017	

Для разработки простых (основанных на суммировании тепловых единиц) и сложных (дополнительно учитывающих потребность растения в накоплении единиц охлаждения) фенологических моделей (М) использованы шесть различных комбинаций уравнений. Для каждой фенологической модели Sf_t – состояние внешнего воздействия, $Sf_t = F^*$ – необходимая сумма тепловых единиц (F^*) для наступления фенофазы, где t – время (сутки), $t = t_2$ – дата фенофазы (день года). Sc_t – состояние охлаждения, C^* – необходимая для завершения периода органического покоя сумма единиц охлаждения, t – время (сутки), $t = t_1$ – дата выхода из органического покоя: потребность в единицах охлаждения (C^*) выполнена, начало аккумуляции тепловых единиц (день года). t_0 – дата начала накопления единиц охлаждения, (день года); T_t – среднесуточная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); T_b – базовая температура для накопления сумм тепловых единиц ($^{\circ}\text{C}$); T_{opt} – оптимальная температура для накопления единиц охлаждения ($^{\circ}\text{C}$); DL – продолжительность светового дня (ч); β , γ , a_1 , a_2 , b_1 , b_2 и d – константы; c – показатель значимости фотопериода.

M1 (GDD_{DOY}) (Chuine, 2003; Herms, 2004) – определены t_l , T_b и F^* :

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < T_b \\ T_t - T_b & T_t \geq T_b \end{cases}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* \quad (1)$$

M2 (BC_{DOY}) (Blümel, 2012) – определены T_b , F^* и c ; $t_l = 1$ января:

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < T_b \\ (T_t - T_b) \cdot (0,1DL)^c & T_t \geq T_b \end{cases}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* \quad (2)$$

M3 (SIG_{DOY}) (Migliavacca, 2012) – определены a_2 , b_2 и F^* ; $t_l = 1$ ноября:

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \frac{1}{1 + e^{b_2(T_t + a_2)}}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* \quad (3)$$

M4 (UNI) (Chuine, 2000) – определены: t_l , a_l , b_l , d и F^* ; $t_l = 1$ августа:

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \frac{1}{1 + e^{d(T_t - a_l)^2 + b_l(T_t - a_l)}}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* \quad (4)$$

M5 (SEQ) (Sarvas, 1974; Hänninen, 1990) – определены: t_l , $Topt$, T_b , β и γ ; $t_0 = 1$ ноября:

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t \geq 10,4 \\ (T_t + 3,4)/Topt + 3,4 & -3,4 < T_t \leq Topt \\ (T_t - 10,4)/Topt - 10,4 & Topt < T_t < 10,4 \end{cases}, \text{ где } S_{ct1} = C^* \quad (5)$$

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < T_b \\ \frac{28,4}{1 + e^{-0,185(T_t - T_b - 18,4)}} & T_t \geq T_b \end{cases}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* = \beta e^{\gamma S_{ct1}}$$

M6 (SEQBC_{DOY}) (Hänninen, 1990; Blümel, 2012) – определены t_l , $Topt$, T_b , β , γ и c ; $t_0 = 1$ ноября:

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t \geq 10,4 \\ (T_t + 3,4)/Topt + 3,4 & -3,4 < T_t \leq Topt \\ (T_t - 10,4)/Topt - 10,4 & Topt < T_t < 10,4 \end{cases}, \text{ где } S_{ct1} = C^* \quad (6)$$

$$Sf_t = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < T_b \\ (T_t - T_b) \cdot (0,1DL)^c & T_t \geq T_b \end{cases}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* = \beta e^{\gamma S_{ct1}}$$

Для верификации моделей использованы данные нечетных годов, для валидации – четных. Сравнение точности аппроксимации моделей осуществлено при помощи коэффициента детерминации (R^2), корня из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Squared Error – RMSE), скорректированного информационного критерия Акаике (AICc) и смещения (Bias) (Chen, 2017; Gauzere, 2017).

Хронобиологический анализ выполнен по методике М.А. Проскурякова (2012). В качестве косвенного индикатора оценки наличия и устойчивости тренда применен показатель Херста (Hurst, 1951).

Для сравнительного анализа экологических условий местообитаний модельных видов растений использованы унифицированные, основанные на идеях Л.Г. Раменского (1956) и Д.Н. Цыганова (1983), 100-балльные шкалы экологических факторов базы данных «Экодата» (Корженевский, 1987, 1990, 1999, 2016). Степень расхождения между экологическим оптимумом модельного вида и экологическими условиями определена по методике Ю.А. Злобина (2013).

Исследования эффективности использования световой энергии, водного режима и устойчивости к гидротермическому стрессу вечнозеленых интродуцентов проведены в 2015–2016 гг. Интенсивность CO_2 -обмена и транспирации листьев определяли с помощью автоматической 4-канальной системы открытого типа «Монитор фотосинтеза РТМ-48А» (Bioinstruments S.R.L., Молдова) (Балаур, 2009, 2013). Измерения проведены при естественной концентрации CO_2 в воздухе около 0,04 %. Для измерения параметров окружающей среды: температуры и влажности воздуха, фотосинтетически активной радиации (ФАР, PAR), применены датчики Метео-модуля РТН-48, для измерения влажности почвы использован датчик SMS-5M, температуры листа – LT-1P.

Для характеристики CO_2 -обмена листа использованы значения скорости видимого фотосинтеза (P_N), суммарного (R_{total}) и темнового (R_D) дыхания, фотодыхания (R_{PR}), устьичной проводимости (g_s) и транспирации (E) в диапазоне ФАР от 0 до 2000 $\mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. При исследовании зависимости скорости P_N от интенсивности света измерения проводились в солнечные, преимущественно ясные дни. Для сравнения измеренных и рассчитанных фотосинтетических параметров были выбраны четыре математических уравнения P_N/I -кривой: модифицированная модель Михаэлиса-Ментен (Кайбеяйнен, 2009); модель гиперболического тангенса (Jassby, Platt, 1976); модифицированные модели гипербол: прямоугольной, способной описывать фотоингибирование процесса непрямоугольной гиперболой (Ye, 2007) и непрямоугольной (Звалинский, 2006). Подбор аппроксимирующей функции P_N/I -зависимости осуществлен методом наименьших квадратов с использованием модуля «Углубленные методы анализа / нелинейное оценивание» в системе Statistica. Все расчеты произведены при заданном уровне значимости $p < 0,05$.

При исследовании водного режима и устойчивости к гидротермическому стрессу полив опытных растений прекращали в период активного роста, влажность почвы в сосудах с контрольными растениями поддерживали на уровне 60-90 % от наименьшей влагоемкости почвы (НВ).

Для эколого-биологического изучения эфирносов были применены полевые опыты в комплексе с лабораторными исследованиями (Доспехов, 1985). Микроклиматические и фитоактинометрические наблюдения проведены согласно соответствующим руководствам (Кельчевская, 1971; Сеницына, 1973). Исследования биоморфологических и хозяйственно-ценных признаков выполнены по общепринятым методикам (Методика селекции..., 1977; Интродукция и селекция..., 2009). Массовую долю эфирного масла определяли по методике А.И. Ермакова (1987). Компонентный состав и содержание летучих веществ в эфирном масле определяли методом газожидкостной хроматографии с помощью прибора Хром – 41 и хроматографа Agilent Technology 6890N с масс-спектрометрическим детектором 5973N. Идентификация выполнялась на основе сравнения полученных масс-спектров с данными библиотеки NIST02 (более 174000

веществ). Индексы удерживания компонентов рассчитывали по результатам контрольных анализов эфирных масел с набором нормальных алканов (Jennings, 1980).

Статистическая обработка экспериментальных данных проведена с помощью пакетов программ (MS Excel2010, Statistica10) стандартными методами обработки рядов наблюдений с использованием графического, дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализов. Значимость полученных оценок проверялась путем расчета стандартных критериев (Стоноженко, 2012; Мاستицкий, 2009; Стукач, 2011; Джамаев, 2013).

РАЗДЕЛ 3 РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

3.1 Оценка временных и пространственных закономерностей формирования климата Южного берега Крыма. В результате анализа многолетних данных метеорологических наблюдений выявлена тесная корреляция ($r = 0,87-0,96$) между рядами среднегодовых и сезонных температур воздуха на станциях ЮБК, что указывает на пространственную однородность изменений температуры. Однородность выпадения осадков отмечается в большинстве сезонов года ($r = 0,80-0,85$), за исключением лета ($r = 0,67$), когда наблюдаются кратковременные ливни конвективного происхождения, обусловленные локальными формами рельефа. Полученные результаты свидетельствуют о наличии единых временных закономерностей формирования климата на территории ЮБК, что значительно упрощает задачу изучения, моделирования, реконструкции недостающих данных и прогнозирования климатических изменений.

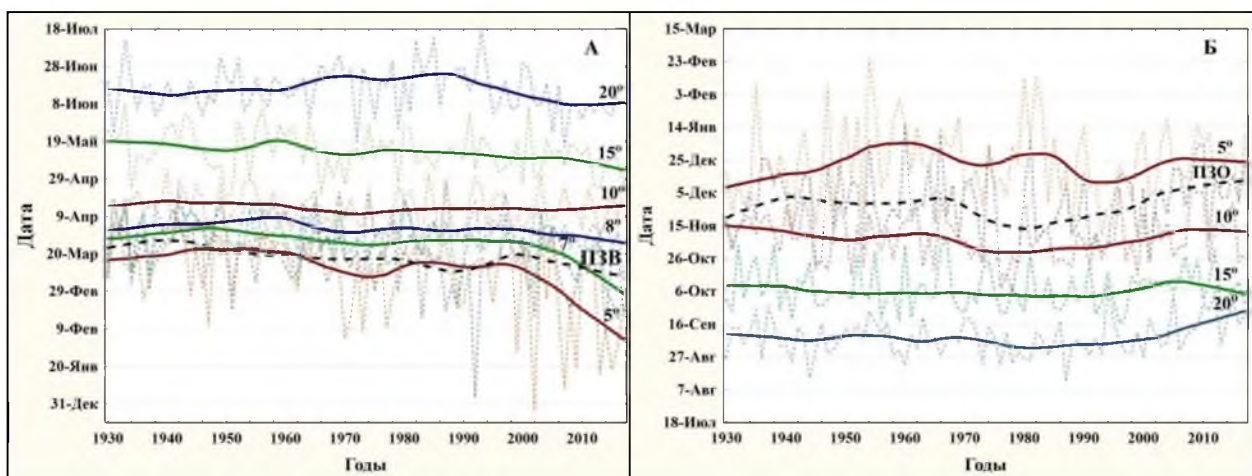
Установлено, что проявление современного потепления в отдельные сезоны года на ЮБК происходило неравномерно. Начало потепления характеризуется повышением летних температур с 1982 г., рост температур зимой и осенью наблюдается с 1988 г., весной – после 1991 г. Наибольшие темпы роста температур отмечены в летний сезон.

На основании пространственной однородности изменений температуры было выполнено приведение метеорологических показателей станций, ранее прекративших свою работу, расположенных на разных высотах над уровнем моря и различных формах рельефа, к длинному ряду наблюдений агрометеостанции Никитский сад. Применение величин рассчитанных вертикальных градиентов и результатов приведения позволяет по данным агрометеостанции Никитский сад дать более надежную характеристику тепло- и влагообеспеченности территории ЮБК с учетом ее микроклиматических особенностей (Фурса, 2006б; Плугатарь, 2015б).

3.2 Ретроспективный анализ изменений климата Южного берега Крыма. В условиях современного потепления климата на ЮБК число волн холода, их продолжительность и интенсивность в зимние месяцы имеют тенденцию к уменьшению, а аналогичные характеристики волн тепла – к увеличению. Благодаря холодной погоде в декабре, а в отдельные годы – ноябре, растения получают необходимую сумму пониженных температур. Продолжительные глубокие оттепели с повышением максимальных температур воздуха до $+12...+16^{\circ}\text{C}$, наблюдаемые в последние годы в январе, способствуют выходу почек из состояния органического покоя, что приводит к снижению морозостойкости растений. Отмеченные выше изменения температурного режима приводят к дальнейшему временному сдвигу в

развитии природно-антропогенных комплексов. В начале XXI века практически ежегодно на ЮБК наблюдалось более раннее развитие весенних процессов.

Установлено, что увеличение продолжительности безморозного периода происходит за счет смещения даты прекращения заморозков весной на более ранние сроки, а начала осенью – более поздние (Рисунок 1). Выявлено, что в первых десятилетиях XXI века произошел сдвиг начала вегетационного периода (устойчивый переход через $+5^{\circ}\text{C}$) весной в сторону более холодной части года и его темпы значительно превосходят скорость смещения последних заморозков. Установлено, что длительность перехода от $+5$ до $+10^{\circ}\text{C}$ весной, в сравнении с базовым периодом (1961–1990 гг.), увеличилась в 1,5-2 раза в результате постепенной трансформации второй половины зимнего периода в ранний, но холодный и затяжной весенний период. При этом возросла его изменчивость и экстремальность, что обуславливает повышение частоты поздних заморозков. Риск повреждений от возвратных заморозков в приморской полосе Южного берега Крыма усиливается с востока на запад.



ПЗВ: дата последнего заморозка в воздухе весной; ПЗО: дата первого заморозка в воздухе осенью. Выделенные сглаженные кривые – сглаживание ряда данных с помощью локально-взвешенной робастной регрессии

Рисунок 1 – Временные изменения дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) через пороговые значения на ЮБК весной (А) и осенью (Б)

Отмечена межгодовая стабильность временных границ для периода активной вегетации с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$. Продолжительность климатического лета изменилась незначительно, однако, продолжительность самой теплой его части с температурами выше $+20^{\circ}\text{C}$ в начале XXI века удлинилась на 20 %, а число аномально жарких дней с максимальной температурой выше $+31^{\circ}\text{C}$ выросло в 2,5-3 раза.

После 1980 г. отмечен устойчивый рост термических ресурсов, представленных суммами активных температур воздуха выше $+5$, $+10$, $+15$ и $+20^{\circ}\text{C}$. Выявлено усиление темпов потепления с середины 1990-х годов. Наибольшая скорость роста показателей теплообеспеченности вегетационного периода и его сезонов наблюдалась с 2005 по 2015 гг. Средние скорости изменений термических ресурсов обладают высокой степенью достоверности.

В годовом ходе осадков прослеживается общая тенденция увеличения в зимние и осенние месяцы и существенное снижение их в весенние и летние. Повышение температуры воздуха в летние месяцы на фоне снижения осадков привело к увеличению испаряемости и усилению засушливых явлений, вызывающих у растений

температурный и водный стресс. С начала XXI века повторяемость критических значений коэффициента увлажнения (0,00-0,06) в июле и августе увеличилась в 2-3 раза. Такая тенденция указывает на аридизацию климата данной территории.

3.3 Перспективная оценка изменений климата. По наиболее вероятному сценарию RCP4.5, на ЮБК в 2021–2040 гг. предполагается рост температур в январе, апреле и в октябре (на 0,8-0,9 °С) и снижение их в марте, июне, августе и в ноябре (на 0,2-0,4 °С). В середине XXI века (2041–2060 гг.) вероятен относительно равномерный небольшой рост температур во все месяцы года (в пределах 0,4-0,7 °С), в конце века – преимущественно теплого периода (с апреля по октябрь).

По жесткому сценарию RCP8.5, в период с 2021 по 2040 гг. ожидается рост температур в декабре, апреле, октябре (на 0,9-1,1 °С), январе (на 1,4 °С) и небольшое их снижение в июне (на 0,5 °С). К концу XXI века, в сравнении с нормой 1961–1990 гг., максимальное повышение температур предполагается в июле-октябре (на 5,1-5,9 °С), минимальное – в ноябре, декабре и апреле (на 3,7-3,8 °С).

Таким образом, при реализации рассмотренных сценариев изменения климата, на территории ЮБК ожидается рост тепловых ресурсов и сохранение климатических тенденций, установившихся в последние десятилетия: наибольший рост температур предполагается в летние и осенние месяцы, а наименьший – в зимние и весенние. После значительных темпов роста в 1998–2017 гг., по наиболее вероятному сценарию RCP4.5, скорость нарастания тепла в 2020–2060 гг. снизится и активизируется только в последнем 20-летии XXI века. По самому неблагоприятному сценарию RCP8.5 в середине и во второй половине столетия предполагается сохранение равномерного повышения температуры с резким возрастанием в 2081–2099 гг. По сценарию RCP4.5 на ЮБК к концу XXI века, в сравнении с базовым климатическим периодом 1961–1990 гг., ожидается увеличение средних сумм активных температур воздуха выше +10 °С на 800-950 °С, а при реализации RCP8.5 – на 1400-1800 °С.

В режиме выпадения осадков предполагается небольшой рост в зимний и весенний периоды (на 5-10 %) и снижение (до 2-22 % в зависимости от сценария) – в летний. Значительных изменений осенью по всем сценария не ожидается. Результаты расчетов будущего климата указывают на статистически значимое уменьшение увлажнения в летний период на фоне роста температур, что свидетельствует об ожидаемом увеличении на ЮБК числа и повторяемости засух (ГГО, режим доступа: <http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>).

РАЗДЕЛ 4 ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТООБИТАНИЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ АБОРИГЕННОЙ ФЛОРЫ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

С целью оценки основных тенденций в изменении экологических условий местообитаний аборигенных видов растений использованы данные исследований растительных сообществ и экосистем южного макросклона Главной гряды Крымских гор (Голубев, 1985) на четырех фиксированных в пространстве высотных мониторинговых профилях (Рисунок 2), репрезентативно представляющих территорию центральной части южного макросклона Главной Гряды. Учетные площадки расположены на высотах 100, 200, 400, 600 и 800 м н.у.м.

Моделирование текущего состояния климатогенной динамики экологических условий местообитаний и ожидаемых в XXI веке по сценарию RCP4.5 осуществлено путем статистических расчетов зависимостей экотопических факторов от

пространственно-распределенных характеристик территории (высоты над уровнем моря, экспозиции и крутизны склона) с учетом результатов приведения к данным агрометеостанции Никитский сад (Плутатарь, 2015б). С помощью базы данных «Экодата», разработанной в лаборатории флоры и растительности НБС-ННЦ, определена экологическая толерантность *Quercus pubescens*, *Juniperus excelsa*, *Juniperus deltoides*, *Arbutus andrachne*, *Cornus mas*, *Sorbus domestica*, *Carpinus orientalis* на Южном берегу Крыма, а также экологические факторы, лимитирующие их развитие: терморежим ($tmVII$), ($tm > 10$) (средняя месячная температура июля и сумма активных температур воздуха выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$); омброрежим (Om) (соотношение осадков и испарения); криорежим (Cr) (средняя температура февраля); континентальность климата (Kn) и увлажнение (Hd) (индекс сухости Будыко).



Рисунок 2 – Схема мониторинговых профилей на южном макросклоне Главной гряды Крымских гор

Анализ экологической амплитуды исследованных видов по ряду факторов позволил установить, что с начала XXI столетия в результате роста температур критическими для *Quercus pubescens* и *Sorbus domestica* являются термо- и омброрежим на высотах 100-200 м н.у.м. Оптимальные условия сложились на высотах около 400 м н.у.м. За первые десятилетия XXI столетия достигли максимальных значений показатели терморежима на высотах 100 м н.у.м. для *Juniperus excelsa*, и превысили на высотах 100-200 м н.у.м. – для *Cornus mas* и *Carpinus orientalis*. Достигли оптимальных значений температуры на высотах 400 м н.у.м. для *Arbutus andrachne*. Сохраняется в пределах диапазона толерантности термический режим для *Juniperus deltoides* на высотах от 100 до 800 м н.у.м.

На основе гипотезы об экологической индивидуальности видов проанализирована происходящая климатогенная динамика смещения точки оптимума вдоль вектора на градиентах факторов-условий и факторов-ресурсов, рассчитаны коэффициенты благоприятности условий среды (D), в которой произрастают аборигенные виды (Рисунок 3). Коэффициент D – мера экологического дискомфорта популяции: чем выше его значение, тем меньше соответствуют условия местообитания экологии изучаемого вида растения (Злобин, 2013).

Для большинства видов максимальные значения D отмечены по термофактору и индексу сухости. Самые высокие значения по данному показателю установлены для *Cornus mas* (Рисунок 3.Д). Выявлено, что основными

лимитирующими факторами для исследованных видов на ЮБК в условиях изменения климата являются характеристики термо- и омброрежима, особенно на высотах 100-200 м н.у.м.



Рисунок 3 – Анализ степени расхождения между экологическим оптимумом *Quercus pubescens* (А), *Juniperus excelsa* (Б), *Juniperus deltoides* (В), *Arbutus andrachne* (Г), *Cornus mas* (Д), *Sorbus domestica* (Е), *Carpinus orientalis* (Ж) и экологическими условиями местообитаний в текущих условиях изменения климата и по сценарию RCP4.5 (южный макросклон Главной гряды Крымских гор, профиль №7)

Анализ положения модельных видов в экологическом пространстве местообитаний за рассмотренный вековой период показал, что с 1981 по 2099 гг. на ЮБК ожидается смещение климатических зон оптимума для произрастания: *Quercus pubescens* – с 200 до 600 м, *Juniperus excelsa* и *Sorbus domestica* – с 200-400 до 600 м, *Juniperus deltoides* – с 100-400 до 600 м, *Arbutus andrachne* – с 100-200 до 400 м, *Cornus mas* – с 400-600 до 800 м, *Carpinus orientalis* – с 200 до 400-

600 м в.н.у.м. Тенденции трансформации условий местообитаний указывают на наиболее вероятные направления эколого-фитоценотической экспансии вида, на пути адаптогенеза. Таким образом, при сохранении роста температур, на ЮБК существует вероятность трансформации ландшафтов и сукцессионных перестроек на высотах около 100-200 м и 600 м над уровнем моря.

По результатам оценки терморежима в текущих климатических условиях и ожидаемых по сценарию RCP4.5, к концу XXI столетия на Южном берегу Крыма для исследованных аборигенных видов существует вероятность смещения зон температурного оптимума по высоте средним на 150-200 м.

РАЗДЕЛ 5 ФЕНОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

5.1 Климатогенная динамика сроков сезонного развития древесно-кустарниковых растений фитоценозов Южного берега Крыма. Анализ температурной чувствительности свидетельствует о смещении фенодат цветения исследованных видов растений на более ранние сроки с ростом среднегодовой температуры. Установлена тесная статистически достоверная связь ($R^2 = 0,53$; $p = 0,017$) между температурной чувствительностью и их биоэкологическими особенностями. Наиболее сильная реакция на изменения среднегодовой температуры воздуха выявлена у раноцветущих видов (*Arbutus andrachne*, *Cornus mas* и *Juniperus excelsa*). Полученные нами результаты согласуются с данными других авторов (Жмылева, 2011; Fitter, 2002; Menzel, 2006; Sherry, 2007).

Выявлено, что степень уязвимости и адаптационные стратегии растений в трансформирующихся климатических условиях различны, на что указывают величины и скорости смещения регрессии (Таблица 2). Самая высокая степень уязвимости к происходящим изменениям среды обитания наблюдается у *Arbutus andrachne* ($\eta_{yx} = 0,60$), статистическая значимость этой связи подтверждается с вероятностью 99,0 %. Самая низкая – у *Cornus mas* и *Syringa vulgaris*.

Таблица 2 – Результаты анализа степени уязвимости, скорости и величины смещения даты начала массового цветения (лета пыльцы у хвойных) растений в 1976–2017 гг.

Вид	Корреляционное отношение, $\eta_{yx} \pm S_n$	d_{yx}	Величина смещения, дни	Скорость смещения, дни/год	Показатель Херста, H	Степень уязвимости
<i>Juniperus excelsa</i>	$0,44 \pm 0,28^{**}$	0,19	–28	–0,68	0,77	Низкая
<i>Cornus mas</i>	$0,19 \pm 0,31$	0,04	–30	–0,73	0,47	Низкая
<i>Arbutus andrachne</i>	$0,60 \pm 0,25^{**}$	0,36	–42	–1,02	0,80	Средняя
<i>Juniperus deltoides</i>	$0,40 \pm 0,29^{**}$	0,16	–17	–0,41	0,46	Низкая
<i>Carpinus orientalis</i>	$0,32 \pm 0,30^*$	0,10	–25	–0,61	0,43	Низкая
<i>Quercus pubescens</i>	$0,34 \pm 0,30^*$	0,12	–11	–0,27	0,73	Низкая
<i>Syringa vulgaris</i>	$0,15 \pm 0,31$	0,02	–9	–0,22	0,47	Низкая
<i>Sorbus domestica</i>	$0,32 \pm 0,30^*$	0,10	–15	–0,37	0,60	Низкая
<i>Rosa canina</i>	$0,51 \pm 0,21^*$	0,26	–1	–0,02	0,75	Средняя
<i>Tilia cordata</i>	$0,47 \pm 0,28^*$	0,22	–19	–0,46	0,72	Низкая

Примечания

1 ** – статистически достоверно на 1%-ом уровне значимости

2 * – статистически достоверно на 5%-ом уровне значимости

Коэффициент Херста в промежутке 0,60–0,80 указывает на высокую вероятность сохранения в ближайшем будущем тенденции смещения на более ранние сроки фаз начала массового цветения *Quercus pubescens*, *Sorbus domestica*, *Arbutus andrachne*, *Rosa canina*, *Tilia cordata* и лета пыльцы у *Juniperus excelsa*. Значения менее 0,5 данного показателя для временных рядов *Carpinus orientalis*, *Cornus mas*, *Juniperus deltoides* и *Syringa vulgaris* свидетельствуют о неустойчивости процесса и склонности к изменению существующей тенденции.

5.2 Методологические основы построения фенологических моделей.

Фенологические модели связывают климатические факторы со сроками наступления фенофаз (начала вегетации, разворачивания листьев, цветения, созревания плодов) (Гордеев, 2006; Ruml, 2005). Предложенные учеными (Sarvas, 1974; Murray, 1989; Hänninen, 1990; Chuine, 2000, 2003; Herms, 2004; Blümel, 2012; Migliavacca, 2012) модели были частично модифицированы нами и отработаны на представителях модельных видов растительных сообществ ЮБК с применением собственной методики и оригинальных алгоритмов обработки. Комплексная схема моделирования реакции растений на изменения климата, используемая в исследовании, представлена на рисунке 4.

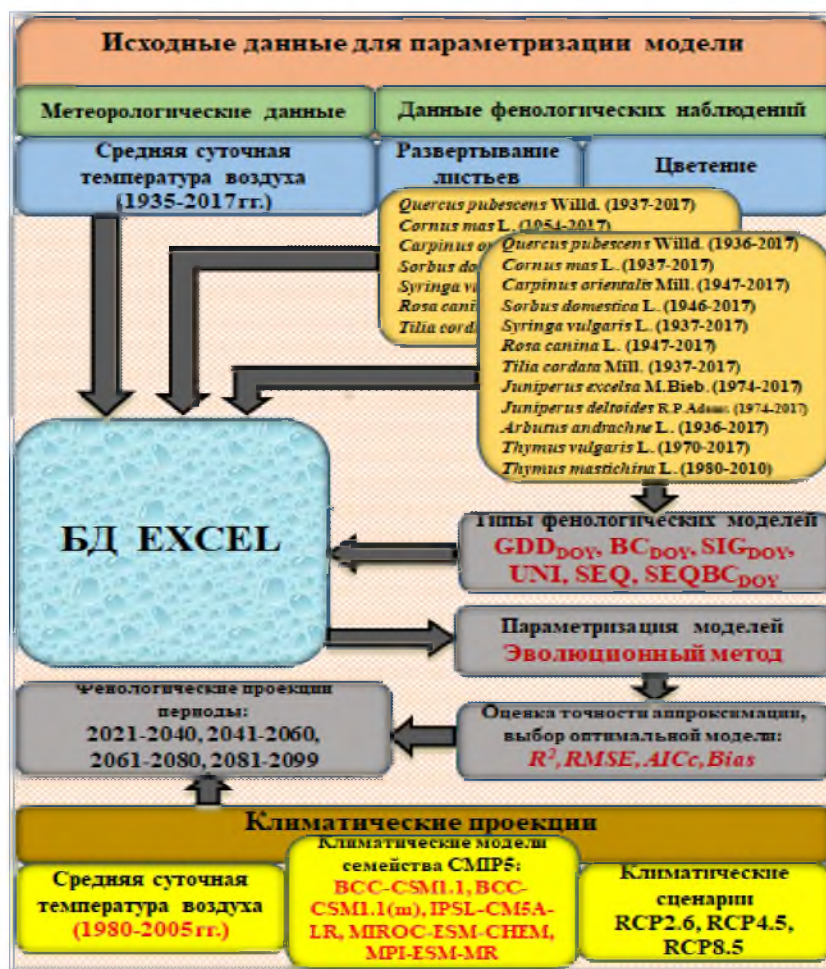


Рисунок 4 – Комплексная схема моделирования реакции растений на изменения климата, используемая в исследовании

Параметры фенологических моделей вычисляли, используя процедуру оптимизации метода «Эволюционный поиск решения» надстройки MS Excel «Поиск

решения» (Додонов, 2011; Winston, 2018). Для прогнозирования возможных сдвигов весеннего развития растений при изменении климата использованы результаты расчетов по ансамблю из пяти климатических моделей семейства CMIP5. Проекции согласованных изменений термических условий и весенней фенологии растений были построены по климатическим сценариям (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5) на 2021–2099 гг. Для осредненных по 20-летиям временных периодов, относительно базового периода за 1981–2000 гг., рассчитаны аномалии дат разворачивания первых листьев и начала массового цветения до 2099 г.

Всего разработано 225 моделей весенней фенологии, из которых по итогам оптимизации отобраны 57 моделей с лучшими результатами. Для дальнейшего использования, с целью фенологического прогнозирования, по итогам оценки точности аппроксимации были выделены 19 моделей, позволяющих адекватно описать и спрогнозировать фенологический отклик модельных видов растений на изменения погодных условий. Данную методику определения параметров моделей в среде MS Excel можно легко адаптировать для целей моделирования в биологии и экологии.

5.3 Реакция растений-феноиндикаторов на климатические изменения в сухих субтропиках: моделирование и прогноз. Установлено, что за весь период с 1937 по 2017 гг. и в течение XX столетия средние показатели сроков разворачивания первых листьев у *Syringa vulgaris*, *Rosa canina* и *Tilia cordata* были относительно стабильными. Максимальный фенологический отклик выявлен в первые десятилетия XXI столетия, когда произошел сдвиг фенодаты на более ранние сроки: у *Syringa vulgaris* – на 4 дня, *Rosa canina* – на 6 дней. При этом, смещение средних дат начала массового цветения было в два раза меньше: *Syringa vulgaris* – на 2 дня, *Rosa canina* – на 3 дня. Максимальный фенологический отклик *Tilia cordata* на изменение температурного режима также проявился в XXI столетии, однако, несколько иначе: средняя дата разворачивания листьев изменилась незначительно (на 2 дня), а цветение – на 7 дней. Произошедшие сдвиги в весеннем развитии хорошо согласуются с результатами детальных исследований на ЮБК динамики временных границ климатических сезонов (Корсакова, 2018о).

По итогам тестирования фенологических моделей растений-индикаторов, для построения проекции согласованных изменений климата и весенней фенологии, выделены последовательные модели М6, показавшие лучшие результаты (Таблица 3).

Таблица 3 – Параметры моделей для прогнозов фенодат весенней фенологии *Syringa vulgaris* (1), *Rosa canina* (2) и *Tilia cordata* (3)

Параметр	Фенологическая фаза развития					
	Разворачивание первых листьев			Начало массового цветения		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
T_{opt} , °C	2,4	4,5	3,5	3,4	4,0	2,7
T_b , °C	4,0	4,6	4,1	4,3	4,0	4,0
c	1,6987	0,2014	0,3809	0,0452	0,0035	0,1551
C^* , °C	14,6	28,6	34,6	31,8	26,9	38,2
F^* , °C	279,0	103,9	270,2	341,6	575,1	993,1
R^2	0,60	0,80	0,65	0,79	0,74	0,47
RMSE, дни	6,8	7,0	5,2	3,5	5,0	7,2
AIC_c	138,1	139,7	123,8	115,7	130,9	172,9
θ , дни	–1,8	1,3	1,5	–0,5	0,5	1,4

Анализ моделирования фенодинамики сроков весеннего развития *Syringa vulgaris*, *Rosa canina* и *Tilia cordata* за исторический период и проекций по климатическим сценариям на 2021–2099 гг. (Рисунок 5) показал, что при реализации наиболее вероятного сценария RCP4.5 в ближайшие 10-20 лет в начале весны значительного повышения температур на ЮБК не ожидается. В связи с этим, опасность повреждения вегетирующих растений поздними весенними заморозками сохранится. Не предполагается в ближайшее время и смещения на более ранние сроки наступления фенологического лета.

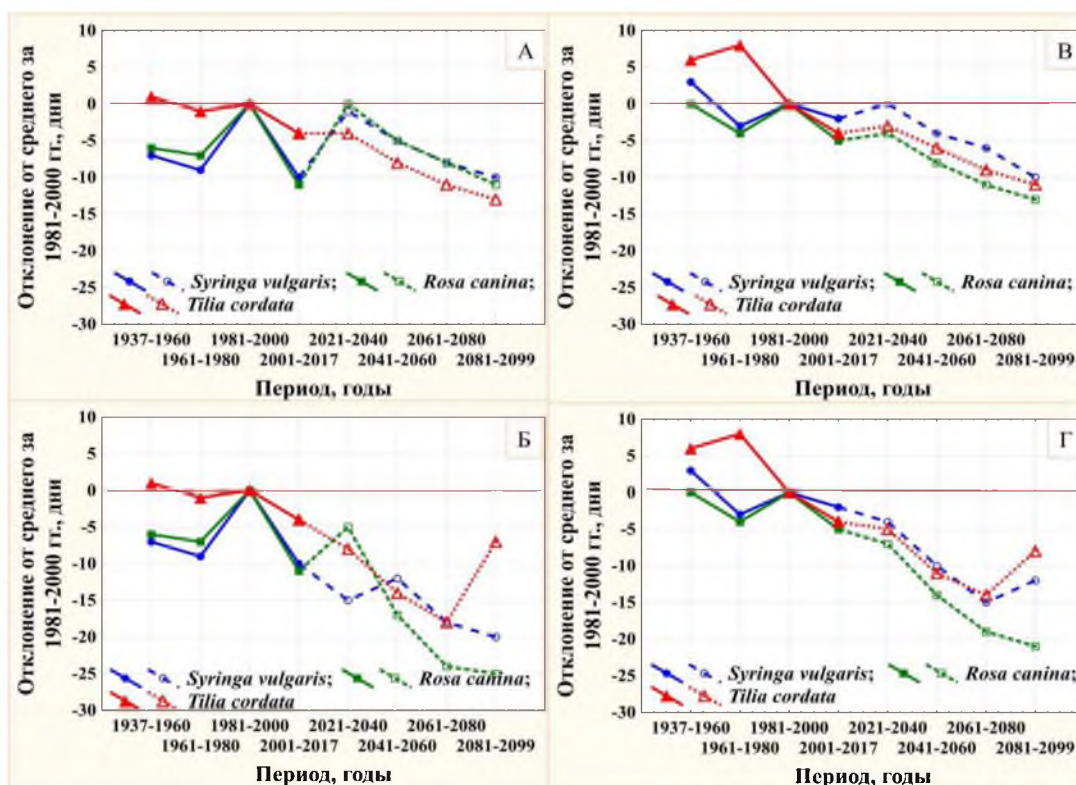


Рисунок 5 – Наблюдаемые (сплошные линии) и прогнозируемые (пунктирные линии) аномалии дат разветывания первых листьев (А–Б) и начала цветения (В–Г) растений-феноиндикаторов на ЮБК при климатических сценариях RCP4.5 (А, В) и RCP8.5 (Б, Г) по отношению к базовому периоду за 1981–2000 гг. (базовый период: дата разветывания первых листьев (начало массового цветения): *Syringa vulgaris* – 16.04 (06.05); *Rosa canina* – 09.04 (26.05); *Tilia cordata* – 29.04 (19.06))

В период с 30-х до 60-х годов XXI столетия границы фенологических сезонов предположительно будут постепенно смещаться на более ранние сроки со средней скоростью около 2-4 дней за 10 лет. В конце XXI столетия ожидается увеличение темпов их смещения до 5-6 дней за 10 лет. При реализации неблагоприятного сценария RCP8.5, к концу столетия скорость смещения может достигнуть 8-11 дней за 10 лет.

5.4 Фенологическая реакция листопадных лесообразующих пород Южного берега Крыма на изменения климата (на примере *Quercus pubescens*). *Quercus pubescens* является основной лесообразующей породой ЮБК, которая формирует ценные южнобережные ксерофитные лесные ассоциации, поднимающиеся местами до 750 м н.у.м. (Кочкин, 1967). Произрастая в жестких аридных условиях, пушистодубовые леса выполняют важные для региона экологические и санитарно-гигиенические функции (Плугатарь, 2015а).

При отсутствии явных трендов в смещении сроков весенней вегетации *Q. pubescens* на ЮБК за 1936–2017 гг., методом корреляционно-регрессионного анализа выявлена высокосignифицирующая обратная зависимость между сроками разворачивания первых листьев ($r = -0,72$; $p < 0,0001$), началом массового цветения ($r = -0,79$; $p < 0,0001$) и температурами воздуха за апрель-май. При повышении температуры воздуха в марте-апреле на 1°C появление первых листьев и массовое цветение происходят в среднем раньше на 3-4 дня.

Достаточно высокая точность прогнозирования (от четырех до шести дней) дат разворачивания первых листьев и начала массового цветения *Q. pubescens* была получена при использовании моделей M1 (GDD_{DOY}), M5 (SEQ) и M6 ($\text{SEQBC}_{\text{DOY}}$) (Рисунок 6). Межгодовую изменчивость фенодат лучше описывали модели M5 и M6, охватывающие периоды органического и вынужденного покоя.

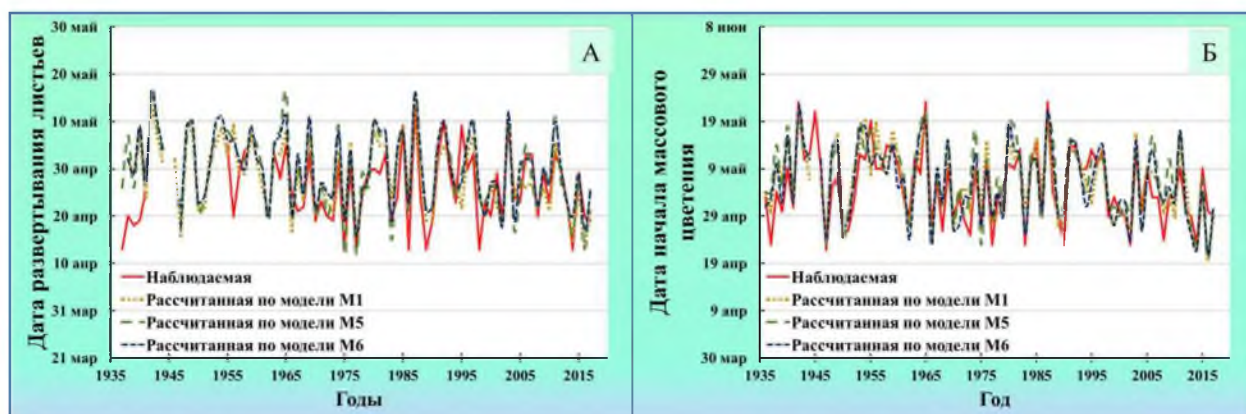


Рисунок 6 – Сравнение фактических (сплошная линия) и рассчитанных (пунктирная линия) по моделям M1, M5 и M6 дат разворачивания первых листьев (А) и начала массового цветения (Б) *Q. pubescens* на ЮБК

Наиболее точное ($\text{RMSE} = 3,9\text{--}4,1$ дней) и эффективное ($R^2 = 0,76\text{--}0,77$) прогнозирование фенодат разворачивания листьев (7) и начала массового цветения (8), согласно большинству индексов оценки качества, показала модель M6, учитывающая воздействие фотопериода на фенологическое развитие. Выявлена фотопериодическая чувствительность периода цветения ($c = 0,6455$):

$$S_{ct} = \sum_{1 \text{ ноя}}^{t1} \begin{cases} 0 & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t \geq 10,4 \\ (T_t + 3,4)/5,0 & -3,4 < T_t \leq 1,6 \\ (T_t - 10,4)/-8,8 & 1,6 < T_t < 10,4 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ct1} = C^* = 30,8 \quad (7)$$

$$S_{ft} = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < 4,0 \\ T_t - 4,0 & T_t \geq 4,0 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ft2} = F^* = 286,8$$

$$S_{ct} = \sum_{1 \text{ ноя}}^{t1} \begin{cases} 0 & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t \geq 10,4 \\ (T_t + 3,4)/6,6 & -3,4 < T_t \leq 3,2 \\ (T_t - 10,4)/-7,2 & 3,2 < T_t < 10,4 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ct1} = C^* = 32,4 \quad (8)$$

$$S_{ft} = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < 4,0 \\ ((T_t - 4,0) \cdot (0,1DL)^{0,6455}) & T_t \geq 4,0 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ft2} = F^* = 414,8$$

Полученные фенологические модели были включены в расчеты при прогнозировании возможных изменений в сроках разворачивания первых листьев и начала массового цветения *Q. pubescens* для будущих климатических условий

ЮБК. По трем основным сценариям (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5) построены проекции согласованных климатических изменений и весенней фенологии на 2021–2099 гг. (Рисунок 7).

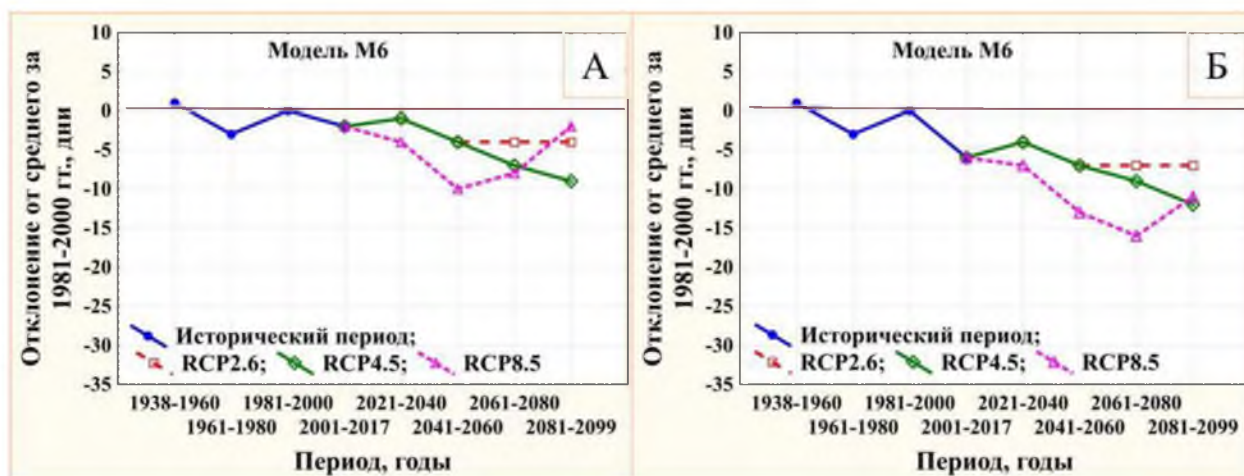


Рисунок 7 – Наблюдаемые и прогнозируемые при климатических сценариях RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 аномалии дат разворачивания первых листьев (А) и начала цветения (Б) *Q. pubescens* на ЮБК по отношению к базовому периоду за 1981–2000 гг. (базовый период: дата разворачивания первых листьев – 29.04; начало массового цветения – 9.05)

Результаты моделирования показали, что в случае реализации самого неблагоприятного климатического сценария RCP8.5, из-за интенсивного роста температур к середине XXI столетия необходимые для окончания периода органического покоя *Q. pubescens* суммы единиц охлаждения не смогут накопиться за зимний период. В связи с этим, во второй половине XXI века существует вероятность сдвига начальных фаз вегетации на более поздние даты: разворачивания первых листьев – на 8 дней, цветения – на 5 дней. По сценарию RCP4.5, с 2041–2060 гг. предполагается динамическое смещение вегетации в сторону более раннего развития, по сравнению с периодами 1981–2000 и 2001–2017 гг. (на 5-6 дней до конца столетия). В 2021–2040 гг. значительных изменений в сроках весеннего развития *Q. pubescens* на ЮБК не ожидается.

5.5 Фенологическая реакция некоторых вечнозеленых автохтонных видов растений Южного берега Крыма на изменения климата. *Juniperus excelsa*, *Arbutus andrachne* и *Juniperus deltoides* являются вечнозелеными аборигенными доминантами древесного или кустарникового ярусов реликтовых высокоможжевеловых редколесий и сообществ земляничника мелкоплодного, находящихся в условиях ЮБК на северной границе своих средиземноморских ареалов (Крайнюк, 2010). Эти виды характеризуются слабым естественным возобновлением, низким качеством семян в естественных и искусственных фитоценозах Крыма, высокой чувствительностью к рекреационной нагрузке и включены в Красные книги Российской Федерации и Республики Крым (Красная книга Российской Федерации..., 2008; Красная книга Республики Крым, 2015).

В результате исследований определена связь начала лета пыльцы *Juniperus excelsa*, *Juniperus deltoides* и цветения *Arbutus andrachne* с температурами зимне-весенних месяцев. Установлено, что начало пыления *Juniperus excelsa* наиболее сопряжено с температурами февраля ($R^2 = 0,51$), а

Juniperus deltoides и *Arbutus andrachne* – марта (R^2 соответственно 0,51 и 0,24). Повышение температуры февраля на 1 °C вызывает отрицательное смещение сроков начала пыления *Juniperus excelsa* на 7 дней, марта – *Juniperus deltoides* на – 4 дня, цветения *Arbutus andrachne* – на 5 дней. Фенодаты начала цветения *Juniperus excelsa* ($\sigma = 15,2-19,5$ дней) и *Arbutus andrachne* ($\sigma = 16,9-18,2$ дней) характеризуются высокой лабильностью, что связано с вариабельностью температур зимне-весенних месяцев (коэффициент вариации в феврале составляет 53-61 %, а в марте – 27-33 %). Коэффициент вариации температур воздуха в апреле значительно ниже (12-16 %), что способствует меньшей разбалансировке дат начала пыления *Juniperus deltoides* ($\sigma = 8,9-9,5$ дней).

Сравнительный анализ многолетней динамики гидротермических условий на ЮБК в период поллинииции *Juniperus excelsa* и *Juniperus deltoides* показал, что основными экологическими факторами, лимитирующими процесс опыления, для *Juniperus excelsa* являются температура воздуха и обилие осадков, для *Juniperus deltoides* – температура, влажность воздуха и обилие осадков. Выявлено, что неблагоприятные гидротермические условия в период поллинииции складываются для данных видов можжевельников, в среднем, три-четыре года из 10. Установлено, что на ЮБК период 2001–2010 гг. не был благоприятным для образования полноценных семян у *Juniperus excelsa*. В период пыления *Juniperus deltoides* выявлено снижение частоты выпадения сильных осадков, что благоприятно для образования полноценных семян. В качестве негативного фактора в период пыления, в 2001–2017 гг. при повышении температур отмечено снижение влажности воздуха ниже критических значений для формирования опылительной капли.

Оценка качества моделей для прогнозирования даты начала массового лета пыльцы *Juniperus excelsa* показала, что наибольшая точность аппроксимации ($R^2 = 0,69$; RMSE = 8,7 дней; Bias = 0,1 дня) получена при использовании модели М4:

$$Sf_t = \sum_{8 \text{ окт}}^{t_2} \frac{1}{1 + e^{0,2739(T_t - 8,553)^2 - 0,00633(T_t - 8,553)}}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* = 53,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Для *Juniperus deltoides* – М6 ($R^2 = 0,82$; RMSE = 4,1 дня; Bias = 1,4 дня):

$$Sc_t = \sum_{1 \text{ ноя}}^{t_1} \begin{cases} 0 & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t \geq 10,4 \\ (T_t + 3,4)/5,7 & -3,4 < T_t \leq 2,3 \\ (T_t - 10,4)/-8,1 & 2,3 < T_t < 10,4 \end{cases}, \text{ где } Sc_{t1} = C^* = 31,9$$

$$Sf_t = \sum_{t_1}^{t_2} \begin{cases} 0 & T_t < 4,1 \\ (T_t - 4,1 \cdot (0,1DL)^{0,8942}) & T_t \geq 4,1 \end{cases}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* = 312,5 \quad (10)$$

Максимальный коэффициент детерминации ($R^2 = 0,40$) и наименьшее смещение (Bias = 0,1) для прогноза фенодаты цветения *Arbutus andrachne* получены по результатам валидации модели М3:

$$Sf_t = \sum_{1 \text{ ноя}}^{t_2} \frac{1}{1 + e^{-0,1766(T_t - 3,2629)}}, \text{ где } Sf_{t2} = F^* = 136,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

По результатам климатического и фенологического моделирования осуществлена перспективная оценка вероятных изменений сроков лета пыльцы и цветения в ценопопуляциях *Juniperus excelsa*, *Juniperus deltoides* и *Arbutus andrachne* на территории природного заповедника «Мыс Мартьян» до конца XXI столетия (Рисунок 8).

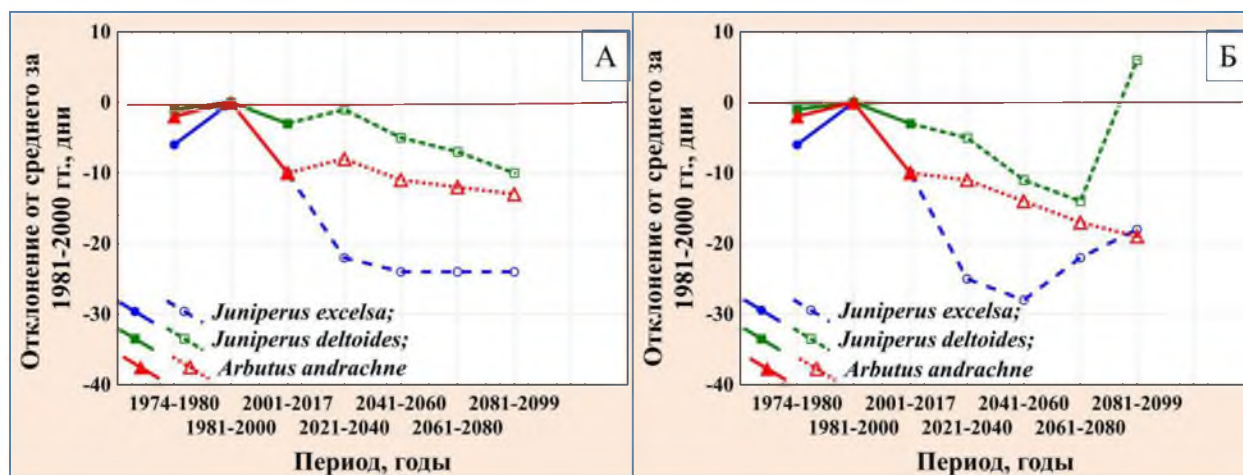


Рисунок 8 – Наблюдаемые (сплошные линии) и прогнозируемые (пунктирные линии) аномалии дат поллинии *Juniperus excelsa*, *Juniperus deltoides* и цветения *Arbutus andrachne* в природном заповеднике «Мыс Мартьян» при климатических сценариях RCP4.5 (А) и RCP8.5 (Б) по отношению к базовому периоду (базовый период за 1981-2000 гг.: дата начала массового лета пыльцы *Juniperus excelsa* – 15.03, *Juniperus deltoides* – 27.04, и цветения *Arbutus andrachne* – 23.04)

Результаты расчетов показали, что при реализации любого из сценариев (RCP4.5 или RCP8.5), реакция *Arbutus andrachne* на повышение температуры характеризуется стабильной отрицательной тенденцией и темпами, прямо зависящими от скорости роста температур. Однако, по сравнению с периодом 2001–2017 гг., ожидаемая величина отрицательного смещения сроков начала массового цветения *Arbutus andrachne* и лета пыльцы *Juniperus deltoides* не превысит 2-8 дней.

Установлено, что в связи с предполагаемым ростом температур в весенний период, в ближайшие десятилетия повышается вероятность ухудшений условий процесса опыления для *Juniperus deltoides*, связанных с низкой относительной влажностью воздуха. Во второй половине XXI столетия при реализации жесткого сценария RCP8.5, из-за недостаточных условий охлаждения в зимний период, предполагается более поздний массовый лет пыльцы у *Juniperus deltoides* (Рисунок 8.Б), что усилит лимитирующее значение влажности воздуха для процесса опыления.

Выявлено, что значительными отрицательными сдвигами в первой половине XXI столетия отличается реакция *Juniperus excelsa* на рост осенне-зимних температур. Уже в 2030-е годы при реализации любого из сценариев массовый лет пыльцы, в среднем, может начинаться раньше 22–25 дней по сравнению с базовым периодом (1981–2000 гг.) и на две недели – по сравнению с 2001–2017 гг. В связи с этим, существует высокая вероятность прохождения фазы лета пыльцы у *Juniperus excelsa* при низких зимних температурах и избыточном количестве осадков, что ухудшит условия для опыления и естественного возобновления. В дальнейшем, до конца столетия ожидаются незначительные отклонения от этих сроков, и даже смещение на 7 дней позже в последнем двадцатилетии по сценарию RCP8.5 (Рисунок 8.Б).

5.6 Фенологическая реакция некоторых видов растений лесных фитоценозов Южного берега Крыма на изменения климата. Анализ многолетних данных фенологического мониторинга сроков весеннего развития *Carpinus orientalis*, *Sorbus domestica* и *Cornus mas* показал умеренную межгодовую вариабельность фенодат начала облиствения исследуемых видов. Выявлена высокая вариабельность фенодат цветения в течение всего периода наблюдений *Cornus mas* ($\sigma = 15,7-22,7$) и в отдельные периоды – *Carpinus orientalis* (1981–2000 гг., $\sigma = 12,1$) и *Sorbus domestica* (1961–1980 гг., $\sigma = 13,5$).

По итогам оценки точности аппроксимации для прогнозирования фенодат разворачивания первых листьев *Carpinus orientalis* и *Cornus mas* были выделены последовательные модели типа SEQ, *Sorbus domestica* – накопления тепловых типа GDD_{DOY}, а для начала массового цветения: *Carpinus orientalis* – последовательные типа SEQ, *Sorbus domestica* – типа SEQBC_{DOY} и *Cornus mas* – накопления тепловых единиц типа UNI (Таблица 4). По климатическим сценариям RCP4.5 и RCP8.5 для данных видов были построены проекции согласованных сроков разворачивания первых листьев и начала массового цветения с ожидаемыми изменениями температурных условий на ЮБК в XXI веке.

Таблица 4 – Параметры моделей для прогнозов фенодат весенней фенологии *Carpinus orientalis* (1), *Sorbus domestica* (2) и *Cornus mas* (3)

Параметр	Фенологическая фаза развития					
	Разворачивание первых листьев			Начало массового цветения		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
$T_{opt}, ^\circ\text{C}$	5,4	–	6,3	7,6	4,2	–
$T_b, ^\circ\text{C}$	6,4	0,0	6,6	8,3	4,2	–
c	–	–	–	–	0,0037	–
$a1$	–	–	–	–	–	1,7200
$b1$	–	–	–	–	–	–0,3621
d	–	–	–	–	–	0,0243
$C^*, ^\circ\text{C}$	36,0	–	33,0	38,6	23,8	–
$F^*, ^\circ\text{C}$	66,0	674,1	58,7	48,3	419,3	157,5
R^2	0,74	0,52	0,75	0,46	0,58	0,38
RMSE, дни	5,0	7,1	5,1	8,3	6,1	15,1
θ , дни	0,1	0,2	–0,4	2,2	–1,0	–1,6

Установлено, что в случае развития сценария RCP4.5 сроки разворачивания первых листьев у *Cornus mas* изменятся незначительно (до 4 дней), у *Carpinus orientalis* и *Sorbus domestica* – до 10-13 дней, смещение фенодаты цветения *Carpinus orientalis* и *Sorbus domestica* на более ранние сроки вероятно с на 7 и 14 дней, соответственно. При жестком сценарии, весеннее развитие (зацветание и разворачивание листьев) у этих видов, к концу XXI века, предполагается 3-3,5 недели раньше в сравнении с базовым периодом 1981–2000 гг. Наибольшая величина сдвига фенодат цветения при развитии любого из двух сценариев ожидается у *Cornus mas* и составит от 22 до 30 дней в зависимости от сценария.

5.7 Моделирование и прогнозирование сроков цветения древесно-кустарниковых растений на высотных профилях. В результате моделирования и прогнозирования фенофаз цветения растений на высотных профилях установлено, что даты их наступления у большинства модельных видов растений коррелируют с

изученным периодом изменения климата ЮБК, однако адаптационные стратегии в трансформирующихся климатических условиях различны. Особенно это проявляется на высотах до 200 м н.у.м., где при развитии жесткого сценария RCP8.5 для некоторых древесно-кустарниковых растений ожидаются недостаточные условия охлаждения в зимний период. Наибольшая величина смещения сроков цветения на более ранние даты отмечена у *Arbutus andrachne*.

Проведенный анализ тенденций и темпов смещения сроков цветения показал отсутствие недостатка в накоплении единиц охлаждения на ЮБК на высотах от 400 до 800 м н.у.м. в будущих климатических условиях, в связи с чем, предполагается синхронное смещение на ранние сроки фенодат цветения исследованных видов растений вслед за повышением температур.

РАЗДЕЛ 6 ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ УСПЕШНОСТИ ИНТРОДУКЦИИ ВЕЧНОЗЕЛЕННЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Применение современного, не повреждающего растения фитомониторного оборудования для исследований вариабельности и разнообразия ответных реакций на действие лимитирующих абиотических факторов у отдельных особей вида позволяет сократить до минимума экспериментальные исследования по стрессоустойчивости растений, разработать практические рекомендации по оптимизации гидротермического режима для роста и развития интродуцентов (Плугатарь, 2015в; Ильницкий, 2018б).

6.1 Модели световых кривых фотосинтеза. С целью подбора оптимальной функции для описания световых кривых вечнозеленых интродуцентов, на примере модельных видов *Nerium oleander*, *Laurus nobilis* и *Aucuba japonica* в условиях открытого грунта (полное освещение) и в теплице (умеренное затенение) проведено сравнение с экспериментальными данными результатов аппроксимации четырех наиболее часто применяемых моделей P_N/I -кривых (Jassby, 1976; Звалинский, 2006; Кайбейнен, 2009; Ye, 2007). Расчеты из уравнений P_N/I -кривых, разработанных A.D. Jassby, T. Platt (1976), Э.Л. Кайбейнен (2009) и Z.-P. Ye (2007) основных фотосинтетических характеристик: квантового выхода фотосинтеза (φ_I), светового компенсационного пункта (LCP) (I_{comp}) и точки светового насыщения (I_{sat}) в программе Excel разработаны F.A. Lobo с соавторами (2013, 2014). Уравнение В.И. Звалинского (2006) было модифицировано нами:

$$P_N = P_{gmax} \cdot \frac{I + I_k - \sqrt{(I + I_k)^2 - 4 \cdot \gamma_I \cdot I \cdot I_k}}{2 \cdot \gamma_I \cdot I_k} - R_D, \quad (12)$$

рассчитаны φ_I (13), φ_{I_0} при $I = 0$ (14), I_{comp} (15) и $I_{sat(n)}$ (16):

$$\varphi_I = \frac{P_{gmax}}{2 \cdot \gamma_I \cdot I_k} \cdot \left(1 - \frac{I + I_k - 2 \cdot \gamma_I \cdot I_k}{\sqrt{(I + I_k)^2 - 4 \cdot \gamma_I \cdot I \cdot I_k}} \right), \quad (13)$$

$$\varphi_{(I_0)} = P_{gmax}/I_k, \quad (14)$$

$$I_{comp} = I_k \cdot R_D \cdot \frac{1 - \gamma_I \cdot \frac{R_D}{P_{gmax}}}{P_{gmax} - R_D}, \quad (15)$$

$$I_{sat(n)} = \frac{I_k \cdot \left(\frac{n}{100} \cdot [R_D - R_{gmax}] - R_D \right) \cdot \left(1 - \gamma \cdot \left[\frac{\frac{n}{100} \cdot (P_{gmax} - R_D) + R_D}{P_{gmax}} \right] \right)}{\left(\frac{n}{100} - 1 \right) \cdot (P_{gmax} - R_D)}, \quad (16)$$

где P_{gmax} – максимальная скорость брутто-фотосинтеза, P_N – скорость нетто-фотосинтеза, R_D – скорость темнового дыхания, мкмоль(CO_2)/(м²·с); I – ФАР, I_{comp} – световой компенсационный пункт (LCP), I_k – световая константа, мкмоль/(м²·с); $\varphi_{(I_0)}$ – квантовый выход фотосинтеза при $I = 0$, мкмоль(CO_2)/(мкмоль(квантов)); γ_I – параметр («кривизны») непрямоугольности гиперболы (безразмерный); $I_{sat(n)}$ – точка светового насыщения, которая определяется при скорости фотосинтеза $P_N + R_D$, равной n % от P_{Nmax} (Lobo, 2013).

Кроме основных кардинальных точек световой кривой, для каждой модели P_N/I -зависимости и вида растения найдено максимальное значение интенсивности света (I_{max}), насыщающее P_N , как точки, за которой нет существенного прироста скорости нетто-фотосинтеза. В этой точке дополнительно была рассчитана максимальная скорость нетто-фотосинтеза ($P_{N(I_{max})}$) при отсутствии фотоингибирования.

Результаты статистического анализа показали достоверность различий параметров P_{gmax} , R_D , I_{comp} , I_{max} , $\varphi(I_{comp})$ (квантовый выход фотосинтеза при $I = I_{comp}$) в условиях полного освещения и умеренного затенения. Коэффициент детерминации между расчетами по уравнениям и экспериментальными данными, составил 94-99 %. Значения параметров P_{gmax} , $\varphi(I_{comp})$, R_D , I_{max} моделей различались между собой от 2 до 60 % в зависимости от вида параметра, а при сравнении с измеренными данными – от 1 до 30 %. Значения параметров, рассчитанные по модифицированной модели Михаэлиса – Ментен, в сравнении с измеренными величинами, были выше на 5–15 %, а рассчитанные по модели гиперболического тангенса – ниже на 3–13 %. Применение модифицированной модели прямоугольной гиперболы, способной описывать фотоингибирование процесса непрямоугольной гиперболой, и модифицированной модели непрямоугольной гиперболы показало высокую степень адекватности предлагаемых моделей для описания реальной зависимости скорости фотосинтеза от интенсивности света для *Nerium oleander*, *Laurus nobilis* и *Aucuba japonica*. Несмотря на значительные количественные различия рассчитанных параметров при использовании одних и тех же исходных данных, общая тенденция показателей активности фотосинтетического аппарата у сравниваемых видов растений сохранялась. Учитывая данный факт, чтобы избежать искажения результатов оценки параметров при сравнении между собой видов растений по отношению к световому фактору либо при изучении данного отношения в динамике в период вегетации, предпочтительно применять одну, наиболее подходящую для всех, функцию. Поскольку значения I_{max} , $P_{N(I_{max})}$ и $\varphi(I)$ всегда находятся в диапазоне проведенных измерений, они более реалистично представляют фотосинтетический потенциал растения. Результаты наших исследований согласуются с выводами F.A. Lobo (2013).

6.2 Оптимальные и критические значения экологических факторов среды, ограничивающие рост и развитие растений. В результате проведенных исследований дана комплексная оценка особенностей регуляции фотосинтетической активности и водного режима вечнозеленых растений *Nerium oleander*, *Laurus nobilis* и *Aucuba japonica*, используемых в озеленении на ЮБК. Установлено, что в условиях оптимального увлажнения почвы самым мощным фотосинтетическим аппаратом обладает *Nerium oleander*, отличающийся высокой скоростью фотохимических реакций, световое насыщение наступает при ФАР 1400-1500 мкмоль/(м²·с) (Рисунок 9.А).

Установлено, что *Laurus nobilis* относится к группе светолюбивых растений с хорошо выраженными признаками теневыносливости. Минимальный уровень ФАР, обеспечивающий в условиях полного освещения максимальную интенсивность фотосинтеза *Laurus nobilis* – 900-1000 мкмоль/(м²·с). Наличие пластичного фотосинтетического аппарата, способность эффективно функционировать в широком диапазоне освещенности, облегчают его адаптацию при выращивании на Южном берегу Крыма под воздействием интенсивной инсоляции на открытых участках и под пологом растений первого яруса в условиях преобладания рассеянной радиации.

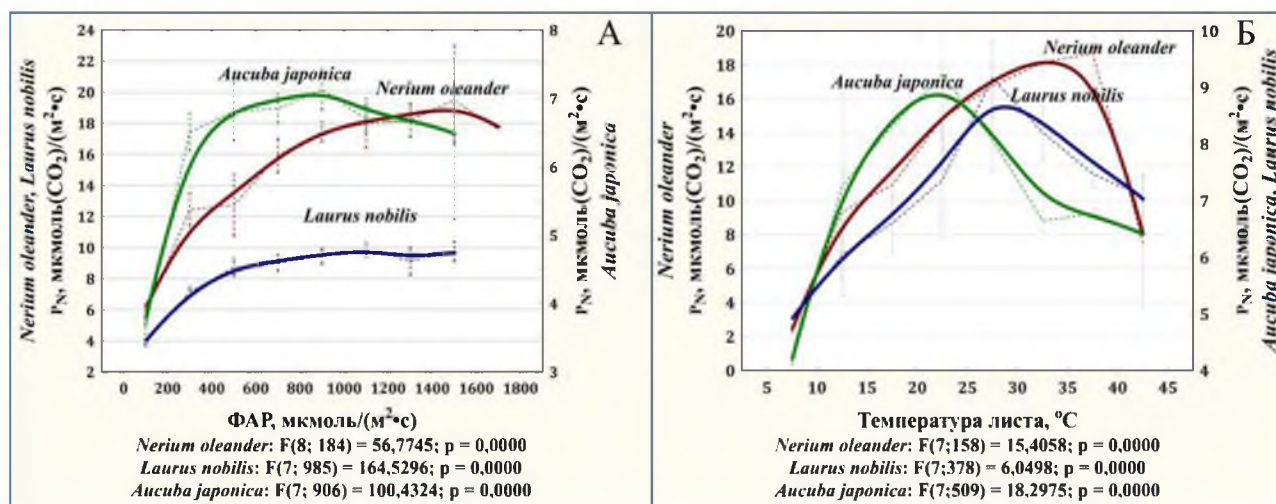


Рисунок 9 – Свет (А)-температурная (Б) зависимость фотосинтетической активности листьев *Nerium oleander*, *Laurus nobilis* и *Aucuba japonica* при отсутствии водного стресса

Самый теневыносливый из всех исследованных видов – *Aucuba japonica*, характеризуется самой низкой активностью фотосинтеза, наиболее эффективно использует невысокие интенсивности света (Рисунок 9.А). Световое насыщение *Aucuba japonica*, в сравнении с другими видами, происходит при более слабом освещении (600-700 мкмоль/(м²·с)). Уровень инсоляции выше 1300 мкмоль/(м²·с) вызывает фотоингибирование и фотоокислительное повреждение фотосинтетического аппарата у растений. Внешне повреждения листьев от перегрева и избыточного освещения проявляются в возникновении хлороза, краевого некроза или в полном высыхании и отмирании значительной их части. Низкий адаптационный потенциал растений к режиму высокой инсоляции, очевидно, отражает генетически закрепленное свойство вида, адаптированного в природных местообитаниях к произрастанию под пологом густого леса (Ali, 2012).

Установлено, что зона экологического оптимума для произрастания *Nerium oleander* находится в диапазонах температур от +23 до +36,5 °С (Рисунок 9.Б), влажности почвы 45-75 % от НВ и ФАР 850-1600 мкмоль/(м²·с). Оптимальные условия окружающей среды для произрастания *Laurus nobilis*: температура – от +24 до +32 °С (Рисунок 9.Б), ФАР 350-1650 мкмоль/(м²·с), влажность почвы 45-75 % от НВ. Свето-температурные условия зоны экологического оптимума *Aucuba japonica* установлены при увлажнении почвы 70-90 % от НВ, температуре от +15 до +26 °С (Рисунок 9.Б) и ФАР – 300-1250 мкмоль/(м²·с) (15-60 % от полной освещенности).

В результате комплексных многофакторных исследований установлено, что пороговым значением проявления водного стресса для *Nerium oleander* является снижение влажности почвы до 20 % от НВ, *Laurus nobilis* – до 35 % от НВ, *Aucuba japonica* – до 40 % от НВ. Выявлены видоспецифичные особенности у растений *Nerium oleander*, *Laurus nobilis* и *Aucuba japonica* в поддержании оптимального, в соответствии с условиями среды, водного баланса (Рисунок 10).

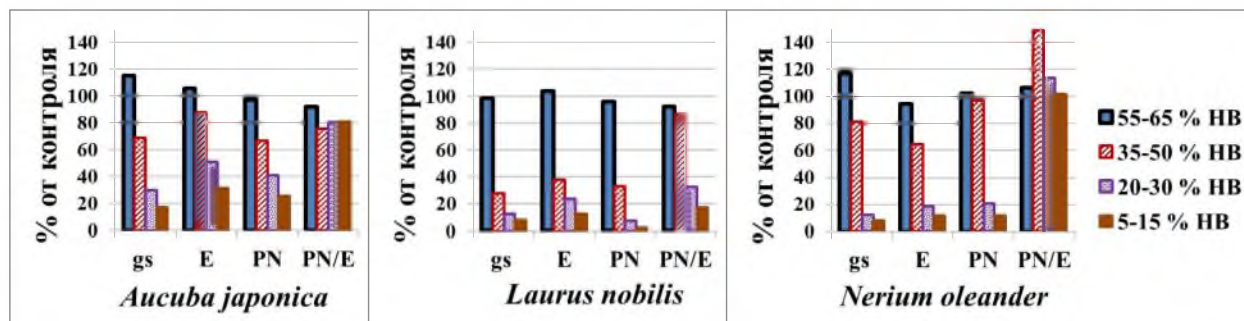
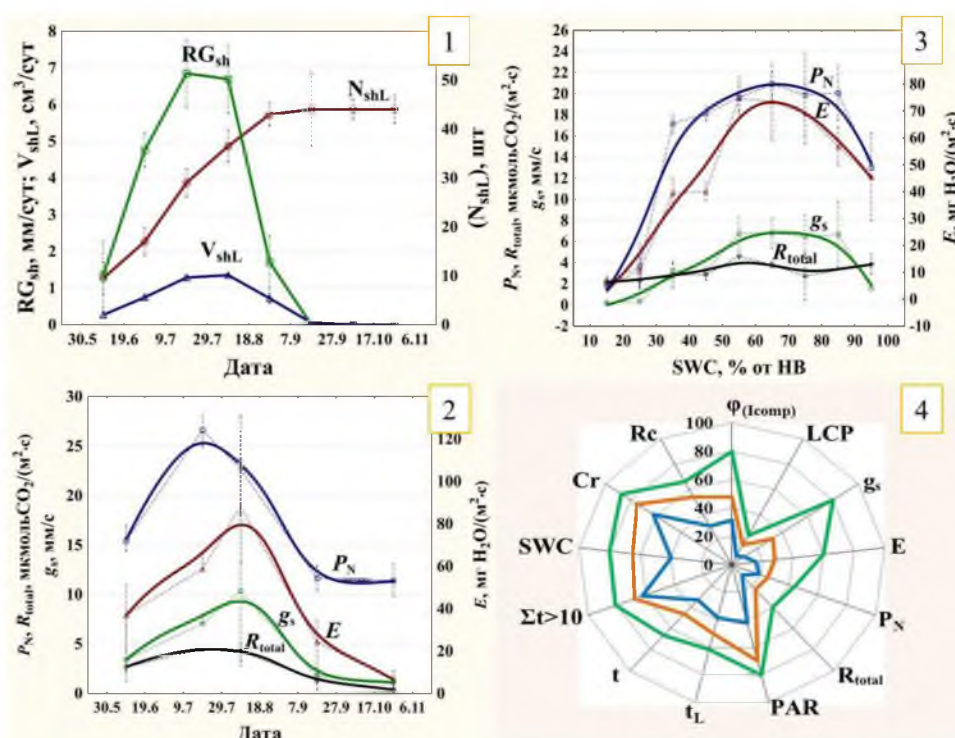


Рисунок 10 – Изменение устьичной проводимости (g_s), интенсивности транспирации (E) и видимого фотосинтеза (P_N) у *Nerium oleander*, *Laurus nobilis* и *Aucuba japonica* в условиях прогрессирующей почвенной засухи

У исследуемых видов проявились две стратегии ответа на водный дефицит. Для *Nerium oleander* и *Laurus nobilis* характерен засухоустойчивый тип регуляции водного баланса путем закрытия устьиц, что повышает их конкурентоспособность в условиях почвенной засухи. Закрытие устьиц предохраняет растения от обезвоживания, но вместе с тем нарушает газообмен. Установлено, что в условиях длительного жесткого гидротермического стресса и высокой инсоляции сокращение потерь воды у *Nerium oleander* реализуется за счет ускоренного старения и частичной дефолиации листьев, что приводит к утрате декоративности.

В ответ на водный дефицит у *Aucuba japonica* выявлена стратегия, направленная на сохранение водного баланса в растении за счет поддержания высокого уровня транспирации. Второй тип реакции является выгодным с точки зрения углеродного и водного баланса при условии достаточной влажности почвы. При недостатке почвенной влаги в период активного роста обнаружена тенденция большего поглощения углекислоты *Aucuba japonica*, по сравнению с *Nerium oleander* и *Laurus nobilis*, приводящая при жесткой засухе к критической потере влаги, и как результат, к появлению краевого некроза тканей на молодых листьях. Зона некроза, в результате комплексного влияния обезвоживания и перегрева, может достигать 50-60 % от площади листа. Приспособлением *Aucuba japonica* к засухе является активация ростовых процессов в наиболее благоприятные для вегетации на ЮБК месяцы: апрель-май и сентябрь.

6.3 Критерии оценки параметров эколого-физиологического паспорта интродуцентов на примере *Nerium oleander*. Результаты исследований особенностей реакций растений на воздействие абиотических стрессоров, уровня экологической пластичности позволяют дифференцировать виды по их эколого-физиологическому потенциалу: особенностям ассимиляционной деятельности, водного режима, засухоустойчивости, теневыносливости. Экологический оптимум, обеспечивающий достижение максимальной скорости процесса фотосинтеза и потенциальные максимумы физиологических параметров для каждого вида флоры могут рассматриваться как его потенциальная эколого-физиологическая характеристика. На примере *Nerium oleander* подобраны 13 основных параметров и их базовые шкалы для эколого-физиологической паспортизации древесно-кустарниковых интродуцентов и потенциальной оценки перспектив их использования (Рисунок 11).



1 – динамика нарастания фитомассы нормально развитого однолетнего побега в оптимальных условиях увлажнения: RG_{sh} (скорость роста побега, мм/сут), N_{sh} (динамика увеличения числа листьев, шт.) и V_{shL} (скорость прироста объема фитомассы листьев, $см^3/сут$);

2 – динамика показателей фотосинтетической активности и водного обмена в оптимальных условиях увлажнения: g_s (устьичная проводимость, мм/с), P_N (скорость нетто-фотосинтеза, $мкмольCO_2/(м^2 \cdot с)$), R_{total} (скорость темнового дыхания, $мкмольCO_2/(м^2 \cdot с)$) и E (интенсивность транспирации, $мгH_2O/(м^2 \cdot с)$);

3 – динамика показателей фотосинтетической активности и водного обмена в условиях нарастания дефицита почвенной влаги;

4 – положение оптимумов (минимальное (синий), максимальное (зеленый) значение и медиана (оранжевый)) для *N. oleander* на градиентах эколого-физиологических факторов.

Рисунок 11 – Эколого-физиологическая характеристика *N. oleander* в условиях Южного берега Крыма

В результате анализа экспериментальных данных в многофакторных опытах определен комплекс внешних условий, обуславливающих наилучшее формирование растения на всех этапах вегетации. Оценена динамика основных показателей жизнедеятельности в период активной вегетации: ритмы роста и динамика нарастания фитомассы (Рисунок 11.1), показатели фотосинтетической активности и водного обмена (Рисунок 11.2). В условиях нарастания водного дефицита выявлены особенности реакции фотосинтетического аппарата и водного режима на воздействие стресс-факторов засушливого периода (Рисунок 11.3). Определены наиболее значимые для оценки эффективности использования световой энергии кардинальные точки световой кривой, экологические оптимумы внешней среды, обеспечивающие максимум фотосинтетической активности (Рисунок 11.4).

Базовые шкалы для оценки экофизиологических параметров (Рисунок 11.4) характеризуются следующими диапазонами: $\Phi(I_{comp})$ (квантовый выход фотосинтеза) – от 0 до 0,125 мкмоль CO_2 /мкмоль квантов (Singaas, 2001); LCP (световой компенсационный пункт) – от 0 до 150 мкмоль квантов/($m^2 \cdot c$) (Lobo, 2013); g_s (максимальная устьичная проводимость) – от 0 до 20 мм/с; E (максимальная транспирация) – от 0 до 250 мг H_2O /($m^2 \cdot c$); P_N (максимальная скорость нетто-фотосинтеза) – от 0 до 80 мкмоль CO_2 /($m^2 \cdot c$) (Nobel, 1991); R_{total} (максимальная скорость суммарного дыхания) – от 0 до 20 мкмоль CO_2 /($m^2 \cdot c$) (Wertin, 2008); PAR (фотосинтетически активная радиация) – от 0 до 2000 мкмоль/($m^2 \cdot c$); t_L (температура листа) – от 0 до +60 °C; t (температура воздуха) – от 0 до +60 °C; $\Sigma t > 10$ (сумма активных температур воздуха выше 10 °C) – от 200 до 5500 °C; SWC (влажность почвы) – от 0 до 100% от НВ почвы; Cr (средняя месячная температура самого холодного месяца) – от –37 до +20 °C (Дидух, 1994); Rc (кислотность почвы) – pH от 3,5 до 10 (Дидух, 1994).

Количественная эколого-физиологическая характеристика вида (сорта) может найти применение в селекционной работе, интродукции растений, а также прогнозировании влияния изменения климата на границы ареалов распространения видов.

РАЗДЕЛ 7 ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ, ИНТРОДУКЦИИ И СЕЛЕКЦИИ ЭФИРОМАСЛИЧНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *THYMUS* L.)

Высокопродуктивные виды и сорта представителей рода *Thymus* L. являются одними из основных перспективных эфиромасличных растений для юга России.

7.1 Влияние абиотических факторов среды на урожайность. На примере *Thymus vulgaris* и *Th. mastichina* в засушливых условиях ЮБК выделены два критических периода относительно потребности растений во влаге: отрастание побегов второй генерации (июль-август) и период интенсивного роста весной (май). Наибольшее влияние на урожай будущего года оказывают осадки за июль-август (43,9 %). На долю влияния осадков за май приходится 25,0 %. Установлено, что основная масса сырья тимьянов формируется в весенний период, а наибольшей величины прирост побегов достигает при водопотреблении более 70 мм за декаду.

7.2 Роль эколого-климатических факторов в изменениях массовой доли эфирного масла. Сравнительное изучение *Th. vulgaris*, *Th. striatus*, *Th. pulegioides*, *Th. mastichina*, *Th. nitens*, *Th. comosus* с помощью многофакторного дисперсионного анализа показало, что на долю влияния видовых особенностей изменчивости массовой доли эфирного масла (ЭМ) приходится 79,2 %, на взаимодействие с факторами среды – 19,8 %. Установлено, что в течение вегетации от фазы бутонизации к созреванию семян синтез ЭМ снижается, а сбор сырья целесообразно проводить во время массового цветения, когда продуктивность растений максимальна. По результатам исследований выделены перспективные для селекции и введения в культуру *Th. mastichina*, *Th. striatus*, *Th. pulegioides* и *Th. vulgaris*, выведены три новых высокопродуктивных сорта: «Светлячок» (для возделывания в условиях ЮБК), «Ялос» и «Юбилейный» (для возделывания на юге России).

В результате многолетних исследований определен экологический оптимум биосинтеза ЭМ для видов с тимольным хемотипом: температура воздуха +16...+18 °С, относительная влажность воздуха 70 %, сумма осадков в период цветения не более 5 мм; и цинеольным: температура воздуха +17...+19 °С, относительная влажность 55 %, не более 10 мм осадков в период цветения.

7.3 Закономерности изменения компонентного состава эфирного масла. В результате исследования динамики содержания основных компонентов тимольного хемотипа ЭМ *Thymus*, установлено, что накопление самого ценного компонента – тимола в значительной степени зависит от условий среды и фазы развития растений: максимальный биосинтез выявлен в начале цветения, минимальный – в период летне-осеннего отрастания. Массовая доля линалоола и 1,8-цинеола – доминирующих компонентов ЭМ линалоольного и цинеольного хемотипов в течение вегетации варьирует в небольших пределах (12-18 %). Четкой динамики в их накоплении не обнаружено. Сравнение аналитических данных ЭМ по годам показало незначительные изменения в качественном составе и значительные различия в количественном (особенно для *n*-цимола, γ -терпинена и тимола), что подтверждает свойственность видам рода *Thymus* в любых условиях сохранять свою наследственность в синтезе терпеноидов. Выявлено, что биогенез тимола в тимольном хемотипе эфирного масла наиболее тесно взаимосвязан с синтезом *n*-цимола и γ -терпинена; биогенез линалоола в линалоольном хемотипе – с тимолом, камфорой и карвакролом; биогенез 1,8-цинеола в цинеольном хемотипе – с тимолом, α -терпинеолом и мирценом.

7.4 Особенности эколого-генетического контроля содержания тимола в эфирном масле видов рода *Thymus* L. При значительных вариациях массовой доли тимола в ЭМ по годам (до 37-49 % в генеративные фазы развития) установлено, что в динамике его накопления сохраняются общие тенденции, характерные для каждого вида. Выявлено, что в течение периода активной вегетации лимитирующие факторы среды различны. Во время весеннего отрастания побегов (март-апрель) при преимущественно оптимальных условиях увлажнения (80-90 % от НВ) на ЮБК, основным фактором, определяющим уровень накопления тимола в ЭМ, является максимальная температура воздуха (Таблица 5).

Таблица 5 – Регрессионные модели воздействия лимитирующих факторов среды на биосинтез тимола в эфирном масле *Thymus*

Фаза развития	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, (R^2)	Уровень значимости, (p)
Весеннее отрастание побегов	$Y = -54,9 + 6,5 x_1$	0,83	$< 0,012$
Бутонизация	$Y = 91,1 + 3,3x_2 - 2,2 x_3$	0,86	$< 0,007$
Цветение	$Y = 169,1 + 0,4 x_4 - 0,7 x_5 - 15,2 x_6$	0,83	$< 0,001$
Созревание семян	$Y = -114,1 + 11,8 x_7 - 38,8x_8 - 1,1x_2$	0,95	$< 0,001$
Отрастание побегов второй генерации	$Y = 492,3 - 54,8 x_9$	0,64	$< 0,018$

Примечание – x_1 – максимальная температура воздуха за последние сутки, °С; x_2 – абсолютная влажность воздуха, г/см³; x_3 – минимальная температура воздуха за трое суток до отбора пробы, °С; x_4 – запасы продуктивной влаги ($W_{пр}$) в слое почвы 0-50 см, % от НВ; x_5 – средняя температура воздуха за пять суток до отбора пробы, °С; x_6 – интенсивность прямой солнечной радиации, кВт/м²; x_7 – средняя температура воздуха за последние сутки, °С; x_8 – интенсивность суммарной солнечной радиации, кВт/м²; x_9 – суточная амплитуда температуры воздуха, °С

Во время бутонизации установлена достоверная положительная связь массовой доли тимола с содержанием влаги в воздухе ($r = 0,82$) и отрицательная – с минимальной температурой ($r = -0,80$). Суммарная доля влияния комплекса факторных признаков составляет 86 %. Параллельно с влиянием на растение окружающей среды под воздействием спектра генов, контролирующих формирование генеративных органов, происходит интенсивное накопление тимола, которое достигает максимума в начале цветения (Рисунок 12.А).

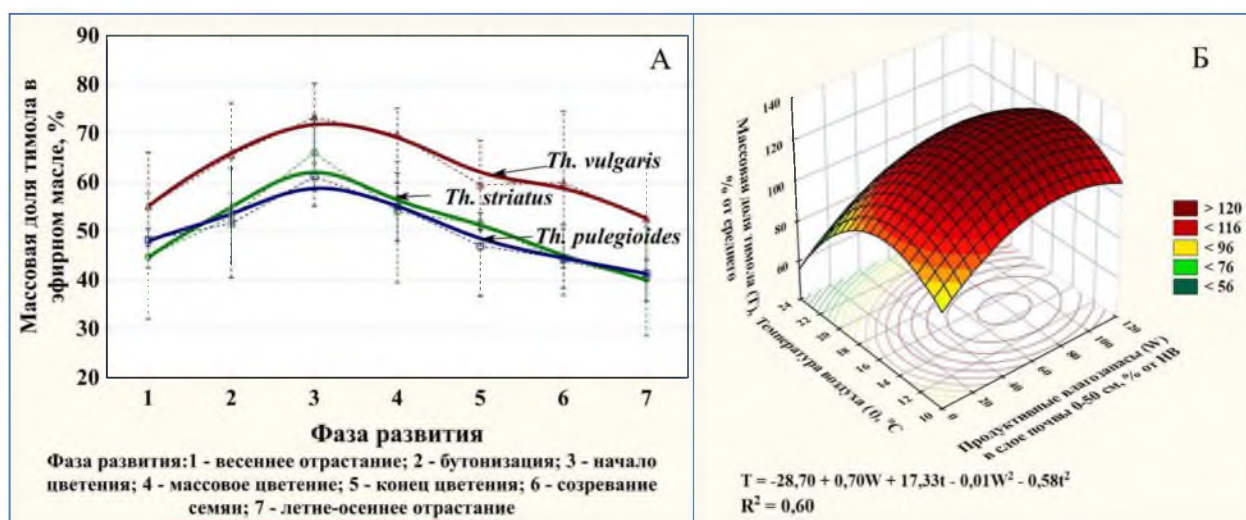


Рисунок 12 – Динамика в период вегетации (А) и зависимость от погодных условий во время цветения (Б) массовой доли тимола (Т, % от среднего) в эфирном масле *Thymus*

В период цветения выявлен комплекс ключевых признаков факторы среды: запасы продуктивной влаги в слое почвы 0-50 см (доля влияния 64,2 %), средняя

температура воздуха (13,5 %) и интенсивность солнечной радиации (5,0 %), определен экологический оптимум накопления тимола: температура воздуха от +13,5 до +16,5 °С при запасах продуктивной влаги в почве от 60 до 90 % НВ (Рисунок 12.Б).

В период созревания семян выявлена прямая зависимость накопления компонента от уровня температуры воздуха ($r = 0,94$), обратная – от интенсивности солнечной радиации ($r = -0,94$) и содержания влаги в воздухе ($r = -0,67$). Совокупно с воздействием лимитирующих факторов среды, во время созревания семян массовую долю тимола контролирует спектр генов, снижающий его биосинтез в период плодоношения.

Летне-осеннее отрастание побегов второй генерации характеризуется самым низким содержанием тимола в эфирном масле тимьянов (Рисунок 12.А). Установлено отрицательное воздействие суточного перепада температур воздуха на биосинтез тимола ($r = -0,80$).

По результатам исследований построена комплексная модель эколого-генетического контроля биосинтеза тимола в эфирном масле *Thymus*, которая учитывает два комплексных фактора накопления тимола: биологические особенности вида и условия среды, сложившиеся в период вегетации. В соответствии с этим модель состоит из двух блоков: генетического и экологического. Генетический блок характеризует влияние на биосинтез тимола вида культуры и фазы развития растения, экологический – погоды и запасов продуктивной влаги в почве в период вегетации (Рисунок 13, Таблица 5).



Рисунок 13 – Модель эколого-генетического контроля биосинтеза тимола в эфирном масле *Thymus*

7.5 Реакция многолетних эфиромасличных культур на изменения климата. Результаты многолетнего феномониторинга *Th. vulgaris* и *Th. mastichina* показали, что у тимьянов наибольшей вариабельностью характеризуется фенофаза весеннего отрастания, наименьшей – массового цветения. Лабильность вступления

в фазу весеннего отрастания указывает на реализацию адаптационного потенциала, а меньшая вариабельность сроков цветения свидетельствует об относительной консервативности ритмики цветения.

7.6 Прогнозная оценка фенологической реакции и тенденций показателей продуктивности эфирносов на климатические изменения. По результатам тестирования для прогнозирования сроков цветения *Th. vulgaris* и *Th. mastichina* были выбраны модели типа SEQ. Для *Th. vulgaris* (RMSE = 6,3):

$$S_{ct} = \sum_{1 \text{ ноя}}^{t1} \begin{cases} 0 & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t \geq 10,4 \\ (T_t + 3,4)/3,4 & -3,4 < T_t \leq 0,0 \\ (T_t - 10,4)/10,4 & 0,0 < T_t < 10,4 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ct1} = C^* = 37,8$$

$$S_{ft} = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < 4,6 \\ \frac{28,4}{1 + e^{-0,185(T_t - 23,0)}} & T_t \geq 4,6 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ft2} = F^* = 256,3 \quad (17)$$

для *Th. mastichina* (RMSE = 6,0):

$$S_{ct} = \sum_{1 \text{ ноя}}^{t1} \begin{cases} 0 & T_t \leq -3,4 \text{ или } T_t \geq 10,4 \\ (T_t + 3,4)/3,4 & -3,4 < T_t \leq 7,6 \\ (T_t - 10,4)/10,4 & 7,6 < T_t < 10,4 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ct1} = C^* = 45,8$$

$$S_{ft} = \sum_{t1}^{t2} \begin{cases} 0 & T_t < 4,8 \\ \frac{28,4}{1 + e^{-0,185(T_t - 23,2)}} & T_t \geq 4,8 \end{cases} \quad , \text{ где } S_{ft2} = F^* = 402,5 \quad (18)$$

Результаты расчетов показали, что при реализации наиболее вероятного климатического сценария RCP4.5 в 2021-2040 гг. по сравнению базовым периодом изменений в сроках цветения *Th. vulgaris* не ожидается (средняя дата 21 мая), а цветение *Th. mastichina* будет происходить, в среднем, на 6 дней раньше (8 июня). К концу XXI века с ростом температур вероятно дальнейшее смещение фенодат цветения тимьянов на более ранние сроки: *Th. vulgaris* – в среднем на 6 дней, *Th. mastichina* – до 11 дней.

Установлено, что благодаря синхронным с климатическими изменениями сдвигам фенологии, в XXI веке, на Южном берегу Крыма в период цветения *Th. vulgaris* условия для биосинтеза эфирного масла и его основного компонента тимола будут находиться в зоне, близкой к оптимальной; *Th. mastichina* – в пределах допустимых значений (не выше +24°C). При реализации сценария RCP8.5 во второй половине XXI века вероятно смещение сроков цветения на более поздние сроки.

По результатам моделирования ближайший 20-летний период 2021–2040 гг. температуры воздуха на ЮБК в период цветения тимьяном на высотах 200-400 м над уровнем моря сохранятся в пределах оптимальных (для *Th. vulgaris*) и допустимых (для *Th. mastichina*) диапазонах для маслообразовательных процессов. К концу XXI века, в 2081–2099 гг. в период цветения *Th. vulgaris* условия для биосинтеза эфирного масла на высотах 200-400 м над уровнем моря ожидаются только на уровне удовлетворительных, а в период цветения *Th. mastichina* – превысят критические. Зоны оптимума предположительно сместятся на высоты 600-800 м над уровнем моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны методологические подходы экологического моделирования реакции аборигенных и интродуцированных видов растений на изменения климата на

примере Южного берега Крыма. На основе созданных и апробированных математических моделей выявлена роль климата, как основного экологического фактора, воздействующего на состояние компонентов экосистем региона. Показана практическая значимость проведенных исследований для прогнозирования адаптивных реакций растений на изменения абиотических факторов среды. На основе анализа многолетних наблюдений на метеостанциях ЮБК выявлена пространственная однородность изменений температуры региона, что упрощает задачу изучения, моделирования, реконструкции недостающих данных, прогнозирования климатических изменений и их воздействий на природно-антропогенные комплексы.

1. Сопряженный анализ многолетних метеорологических и фенологических данных с 1936 по 2017 гг., охватывающий периоды похолодания и потепления, позволил выявить закономерности экотопической изменчивости сроков наступления весенних фенофаз, являющихся наиболее уязвимыми для модельных видов растений, представленных различными жизненными формами и экологическими группами из естественной и интродуцированной флоры Южного берега Крыма. Установлена согласованность сроков развития большинства видов растений с наблюдаемой климатогенной динамикой, выявлены различия их адаптационных стратегий и степени уязвимости. Максимальные величины смещений фенофазы цветения выявлены у раноцветущих видов растений.

2. Установлено, что в результате глобального потепления, на ЮБК в начале XXI века произошел сдвиг весеннего и летнего климатических сезонов, в 2,5-3 раза увеличилось число аномально жарких дней. Выявлено увеличение количества осадков в зимний период и их снижение в весенне-летний на фоне роста летних температур, что указывает на аридизацию климата. При реализации наиболее вероятного сценария RCP4.5 в ближайшие 10-20 лет в начале весны значительного повышения температур на ЮБК не ожидается, что обуславливает сохранение риска повреждения вегетирующих растений поздними весенними заморозками. Не предполагается в ближайшее время и сдвига на более ранние сроки наступления фенологического лета.

3. Установлено, что в результате роста температур в начале XXI столетия границы толерантности *Quercus pubescens* и *Sorbus domestica* по факторам термо- и омброрежима на высотах 100-200 м над уровнем моря находятся в зоне пессимума, оптимальные условия отмечены на высотах около 400 м над уровнем моря, на основании чего могут быть спрогнозированы сукцессионные изменения на высотах 100-200 м. К концу XXI столетия по среднему климатическому сценарию ожидается смещение климатических оптимумов произрастания *Quercus pubescens* с 200 до 600 м над уровнем моря, *Juniperus excelsa* – с 200-400 до 600 м, *Juniperus deltoides* – с 100-400 до 600 м, *Arbutus andrachne* – с 100-200 до 400 м, *Cornus mas* – с 400-600 до 800 м, *Carpinus orientalis* – с 200 до 400-600 м и *Sorbus domestica* – с 200-400 до 600 м. Таким образом, при сохранении тенденции роста температур, на ЮБК существует вероятность трансформации ландшафтов и сукцессионных перестроек на высотах около 100-200 и 600 м над уровнем моря.

4. Создана электронная база метеорологических и фенологических данных в среде Microsoft Excel. На примере простых и комбинированных фенологических моделей разработана доступная универсальная методика построения связей процессов живой природы с метеорологическими данными с использованием

электронно-табличного моделирования и оптимизации. Из разработанных оригинальных 225 моделей выделено 19 моделей, позволяющих адекватно описать и спрогнозировать фенологический отклик модельных видов растений на изменения погодных условий, сделана перспективная оценка их ожидаемой реакции на климатические изменения по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 на 2021–2099 гг. По результатам моделирования предполагается, что в 2021–2040 гг. значительных отклонений от средних показателей фенологического развития периода 2001–2017 гг. не ожидается, за исключением сроков поллинии *Juniperus excelsa* и цветения *Cornus mas*. Из-за недостаточных условий охлаждения на высотах 100–200 м над уровнем моря при реализации сценария RCP8.5 в последней четверти XXI столетия существует вероятность сдвига начальных фаз вегетации у некоторых древесно-кустарниковых видов растений на более поздние даты.

5. Установлено, что основными лимитирующими процесс опыления экологическими факторами на ЮБК для *Juniperus excelsa* являются температура воздуха и обилие осадков, у *Juniperus deltoides* – температура, влажность воздуха и обилие осадков. При любых сценариях развития климата после 2020 г. для *J. deltoides* увеличивается вероятность ухудшения условий для процесса опыления, связанных с низкой относительной влажностью воздуха, после 2060 г. при реализации жесткого сценария RCP8.5 возможно более позднее массовое пыление, что усилит лимитирующее значение влажности воздуха. Для *J. excelsa* существует высокая вероятность прохождения фазы лета пыльцы при низких зимних температурах и избыточном количестве осадков, что ухудшит условия для опыления и естественного возобновления. Эти данные могут быть использованы при разработке стратегии сохранения естественных сообществ с участием данных видов на Южном берегу Крыма.

6. На основании изучения адаптивной реакции фотосинтетического аппарата и водного обмена некоторых декоративных вечнозеленых интродуцентов ЮБК на действие абиотических факторов, их стратегии в поддержании оптимального, в соответствии с условиями среды, водного баланса определены кардинальные точки световой кривой, экологические оптимумы внешней среды, обеспечивающие максимум фотосинтетической активности. На примере *Nerium oleander* выбраны 13 наиболее информативных параметров и на их основе созданы базовые шкалы для эколого-физиологической паспортизации древесно-кустарниковых интродуцентов и потенциальной оценки перспектив их использования.

7. Разработаны методологические подходы с использованием численных методов моделирования, позволяющие объединить в один комплекс научные исследования по интродукции, селекции и их практическую реализацию на примере эфиромасличных культур рода *Thymus*. На основании анализа выявленных основных абиотических факторов среды, лимитирующих урожайность сырья, биосинтез эфирного масла и его основных компонентов, построена комплексная модель эколого-генетического контроля биосинтеза ценного компонента эфирного масла – тимола. Выявлены оптимальные условия культивирования видов рода *Thymus* при реализации двух климатических сценариев.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

При анализе пригодности экотопа для произрастания некоторого вида, целесообразно определять участки территории, где данный вид произрастать не

может. На таких участках интервал толерантности вида по одному из рассмотренных экотопических факторов не пересекается с величиной данного фактора. Аналогичным образом карты экотопических ограничений могут быть получены для любого вида.

Созданные на базе MS Excel с использованием инструмента «Поиск решения» шаблоны для расчета параметров различных моделей, сопряженных с метеопараметрами, можно использовать в прикладных областях биологии.

Простые фенологические модели можно использовать для прогнозирования фенодат в современных климатических условиях. Последовательные модели могут дополнительно использоваться для проецирования возможных в будущем сдвигов во времени периода вегетации вслед за изменениями климата, а также для дополнения отсутствующих данных в фенологических временных рядах или для их расширения.

Представленная методология прогнозирования на основе фенологических и метеорологических данных может быть применена для прогноза цветения аллергенов, развития вредителей и болезней, фенологии животных.

При исследовании световой зависимости фотосинтеза для сравнения между собой видов растений по отношению к световому фактору предпочтительно применять одну, наиболее подходящую для всех видов, функцию.

Полученные данные об экологических предпочтениях *Nerium oleander*, *Laurus nobilis* и *Aucuba japonica* могут быть эффективно использованы как для селекции растений, так и для их коммерческого выращивания.

Одним из важнейших достоинств полученных моделей для тимьянов является возможность прогнозирования массовой доли эфирного масла и содержания в нем основных компонентов. Построенные регрессионные модели позволяют рассчитать количество тимола в эфирном масле за конкретный год с учетом погодных условий года и влагозапасов почвы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

1. Корсакова, С.П. Особенности водного обмена *Nerium oleander* L. в условиях прогрессирующей почвенной засухи / С.П. Корсакова, Ю.В. Плугатарь, О.А. Ильницкий, Э.И. Клейман // Юг России: экология, развитие. – 2018г. – Т. 13, № 1. – С. 101–115.
2. Корсакова, С.П. Экспериментальная проверка моделей световых кривых при оценке фотосинтетической активности на примере декоративных растений / С.П. Корсакова, Ю.В. Плугатарь, О.А. Ильницкий // Российская сельскохозяйственная наука, 2018г. – № 6. – С. 25–32.
3. Паштецкий, А.В. Взаимосвязь между засухоустойчивостью *Laurus nobilis* L. и факторами внешней среды в условиях Южного берега Крыма / А. В. Паштецкий, Ю.В. Плугатарь, О.А. Ильницкий, С.П. Корсакова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2018. – №1. – С. 13–17.
4. Pashtetsky, A.V. Relationship between Drought Tolerance of *Laurus nobilis* L. and Environmental Factors in Conditions of the Southern Coast of Crimea / A.V. Pashtetsky, Yu.V. Plugatar, O.A. Initsky, S.P. Korsakova // Russian Agricultural Sciences. – 2018. – Vol. 44, N 2. – P. 124–129.
5. Ильницкий, О.А. Зависимость интенсивности фотосинтеза *Nerium oleander* L. от факторов внешней среды (Тв, I-ФАР, Двоз.), температуры листьев, транспирации и их изменение в ходе вегетации в условиях ЮБК / О.А. Ильницкий, А.В. Паштецкий, Ю.В. Плугатарь, С.П. Корсакова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2018а. – № 2. – С. 14–19.

6. Ilnitsky, O.A. Dependency of a Photosynthesis Rate in *Nerium oleander* L. on Environmental Factors, Leaf Temperature, Transpiration, and Their Change During Vegetation in Subtropics / O.A. Ilnitsky, A.V. Pashtetsky, Yu.V. Plugatar, S.P. Korsakova // Russian Agricultural Sciences. – 2018. – Vol. 44, N 3. – P. 224–228.

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

7. Корсакова, С.П. Суточные колебания массовой доли эфирного масла некоторых представителей рода *Thymus* L. в период массового цветения на Южном берегу Крыма / С.П. Корсакова // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2011. – Т. 133. – С. 90–104.

8. Ильницкий, О.А. Проблема «кислотных осадков» на Южном берегу Крыма и их влияние на растительный мир / О.А. Ильницкий, Ю.В. Пругатарь, С.П. Корсакова // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2014. – Вып. 111. – С. 7–21.

9. Пругатарь, Ю.В. Динамическая модель водного режима некоторых видов кустарников нижнего яруса в условиях фитолимата парков ЮБК / Ю.В. Пругатарь, О.А. Ильницкий, М.С. Ковалев, С.П. Корсакова // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2014. – Т. 139. – С. 15–31.

10. Корсакова, С.П. Обзор стихийных гидрометеорологических явлений в районе Никитского ботанического сада / С.П. Корсакова // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2014. – Т. 139. – С. 79–93.

11. Корсакова, С.П. Оценка будущих изменений климата на Южном берегу Крыма / С.П. Корсакова // Эcosystemы. – 2018а. – Вып. 15 (45). – С. 151–165.

12. Корсакова, С.П. Прогнозные оценки тепловых ресурсов для адаптации растениеводства и лесного хозяйства к изменениям климата / С.П. Корсакова // АгроЭкоИнфо. – 2018б, № 3. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_359.doc.

13. Корсакова, С.П. Фенологическая реакция *Quercus pubescens* Willd. на климатические изменения в условиях сухих субтропиков / С.П. Корсакова // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2018в. – Вып. 2 (6). – С. 30–46.

14. Корсакова, С.П. Сравнение моделей световых кривых фотосинтеза на примере вечнозеленых видов растений / С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий, Ю.В. Пругатарь // Наука юга России. – 2018п. – Т. 14, № 3. – С. 88–100.

15. Корсакова, С.П. Анализ временной изменчивости характеристик термического режима на Южном берегу Крыма / С.П. Корсакова // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2018г. – Вып. 128. – С. 100–111.

16. Корсакова, С.П. Реакция растений-феноиндикаторов умеренных широт на изменение климата в сухих субтропиках: моделирование и прогноз / С.П. Корсакова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биологи. Химия. – 2018д. – Т. 4(70), № 3. – С. 109–124.

17. Корсакова, С.П. Критерии оценки параметров эколого-физиологического паспорта растений / С.П. Корсакова // Таврический вестник аграрной науки. – 2018м. – № 4(16). – С. 57–65.

18. Корсакова, С.П. Оценка экологического режима местообитаний растений в условиях изменения климата / С.П. Корсакова, В.В. Корженевский // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2018т. – Вып. 4 (8). – С. 26–33.

Монографии, рекомендации:

19. Корсакова, С.П. Интродукция и селекция видов рода *Thymus* L. (биология, экология, биохимия): монография / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов, М.И. Федорчук, В.Г. Федорчук. – Херсон : Айлант, 2012. – 244 с.

20. Пругатарь, Ю.В. Экологический мониторинг Южного берега Крыма / Ю.В. Пругатарь, С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий. – Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2015б. – 164 с.

21. Ильницкий, О.А. Методология, приборная база и практика проведения фитомониторинга / О.А. Ильницкий, Ю.В. Пругатарь, С.П. Корсакова. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018г. – 236 с.

22. Фурса, Д.И. Радиационный и гидротермический режим Южного берега Крыма по данным агрометеостанции «Никитский сад» за 1930-2004 гг. и его учет в практике

виноградарства / Д.И. Фурса, С.П. Корсакова, А.Г. Амирджанов, В.П. Фурса. – Ялта : ВНИИВиВ «Магарач», 2006а. – 54 с.

23. Фурса, Д.И. Агроклиматические ресурсы Южного берега Крыма в районе большой Ялты и их оценка применительно к винограду / Д.И. Фурса, С.П. Корсакова, В.П. Фурса, В.И. Иванченко. – Ялта : ВНИИВиВ «Магарач», 2006б. – 60 с.

24. Работягов, В.Д. Методические рекомендации по возделыванию и переработке чабреца камфорного / В.Д. Работягов, Д.И. Фурса, С.П. Корсакова. – Ялта: ГНБС, 1997. – 15 с.

Научные статьи в журналах, сборниках:

25. Корсакова, С.П. Влияние экологических факторов на биологию цветения чабреца / С.П. Корсакова // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 1997а. – Вып. 78. – С. 50–54.

26. Корсакова, С.П. Особенности онтогенеза чабреца камфорного в условиях Южного берега Крыма / С.П. Корсакова // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 1997б. – Вып. 78. – С. 55–58.

27. Корсакова, С.П. Влияние гидротермических факторов на урожай сырья чабреца / С.П. Корсакова, Д.И. Фурса, В.Д. Работягов // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 1998б. – Вып. 80. – С. 175–179.

28. Корсакова, С.П. Наследование массовой доли и компонентного состава эфирного масла при межвидовой гибридизации рода *Thymus* L. / С.П. Корсакова // Интродукция растений. – 2000а. – № 1. – С. 154–156.

29. Корсакова, С.П. Внутривидовая изменчивость состава эфирного масла чабреца при семенном размножении / С.П. Корсакова // Физиология и биохимия культурных растений. – 2001а. – Т. 33, № 5. – С. 398–403.

30. Корсакова, С.П. Анатомия и локализация эфиромасличных железок у *Thymus* L. / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов, Д.И. Фурса // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2002. – Вып. 84. – С. 23–25.

31. Korsakova, S. Major interaction between climate change and biological diversity / S. Korsakova // CagM Report № 91, WMO/TD № 1166. – Geneva, Switzerland, September 2003a. – P. 3–26.

32. Korsakova, S. Sustainable agricultural practices directly or indirectly contributing to the conservation of biological diversity / S. Korsakova // CagM Report № 91, WMO/TD № 1166. – Geneva, Switzerland, September 2003b. – P. 79–92.

33. Корсакова, С.П. Влияние агрометеорологических условий Южного берега Крыма на развитие *Thymus camphoratus* / С.П. Корсакова, Д.И. Фурса, В.Д. Работягов // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2003. – Вып. 87. – С. 60–62.

34. Фурса, Д.И. Агроклиматическая характеристика морозоопасности территории Никитского ботанического сада по данным агрометеостанции Никитский сад за 1930–2000 гг. / Д.И. Фурса, С.П. Корсакова, В.П. Фурса // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2004. – Т. 124. – С. 113–121.

35. Корсакова, С.П. Модель эколого-генетического контроля биосинтеза тимола в эфирном масле *Thymus* L. / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов, Б.А. Виноградов // Черноморский ботанический журнал. – Т. 2, № 1. – 2006. – С. 50–59.

36. Кутровская, М.Н. О влиянии метеорологических факторов на фенологическое развитие древесных пионов (*Paeonia suffruticosa* Andr.) на Южном берегу Крыма / М.Н. Кутровская, С.П. Корсакова // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2006. – Вып. 93. – С. 28–34.

37. Korsakova, S. Impact of Climate Change on the Grape Productivity in the Southern Coast of the Crimea / S. Korsakova // S.D. Attri et al. (eds.) Challenges and Opportunities in Agrometeorology. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2011. – Chapter 29. – P. 385–394.

38. Плугатарь, Ю.В. Экофизиологические характеристики некоторых видов кустарников нижнего яруса в условиях микроклимата парков ЮБК / Ю.В. Плугатарь, О.А. Ильницкий, М.С. Ковалев, С.П. Корсакова // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2015г. – Вып. 115. – С. 7–17.

39. Корсакова, С.П. Агроклиматические ресурсы участка № 32 Никитского ботанического сада / С.П. Корсакова // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартыан». – 2015. – Вып. 6. – С. 6–19.
40. Плугатарь, Ю.В. Экологический фитомониторинг – исторический ракурс, состояние и перспективы / Ю.В. Плугатарь, О.А. Ильницкий, С.П. Корсакова, А.В. Паштецкий // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2015в. – Вып. 114. – С. 7–13.
41. Плугатарь, Ю.В. Особенности светового режима в подкроновом пространстве древесных растений на примере арборетума Никитского ботанического сада / Ю.В. Плугатарь, М.С. Ковалев, О.А. Ильницкий, С.П. Корсакова, А.В. Паштецкий // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2015д. – Вып. 116. – С. 7–18.
42. Ильницкий, О.А. Зависимость засухоустойчивости *Nerium oleander* L. от факторов внешней среды в условиях Южного берега Крыма / О.А. Ильницкий, Ю.В. Плугатарь, С.П. Корсакова, М.С. Ковалев, А.В. Паштецкий // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2016б. – Т. 142. – С. 139–149.
43. Паштецкий, А.В. Зависимость интенсивности фотосинтеза *Laurus nobilis* L. от факторов внешней среды (ТВ, I-ФАР, ДВОЗ.), температуры листьев, транспирации и их изменение в ходе вегетации в условиях ЮБК / А.В. Паштецкий, Ю.В. Плугатарь, О.А. Ильницкий, С.П. Корсакова, М.С. Ковалев, А.Т. Гиль // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2017а. – Вып. 4(67). – С. 166–173.
44. Корсакова, С.П. Зависимость фотосинтеза у *Aucuba japonica variegata* Thunb. от факторов среды в норме и в условиях почвенной засухи / С.П. Корсакова // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2017а. – Вып. 4(67). – С. 102–106.
45. Корсакова, С.П. Морфобиологическая характеристика и компонентный состав эфирного масла видов рода *Thymus* L. / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов, У.И. Канцаева // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2017б. – Вып. 4(67). – С. 107–110.
46. Марко, Н.В. Виды растений с высоким содержанием тимола из коллекции Никитского ботанического сада / Н.В. Марко, В.Д. Работягов, С.П. Корсакова, О.М. Шевчук, С.А. Феськов, Т.И. Орел, Н.Н. Бакова // Таврический вестник аграрной науки. – 2017. – № 3(11). – С. 17–30.
47. Работягов, В.Д. Морфологическая характеристика перспективных форм *Thymus mastichina* L. / В.Д. Работягов, С.П. Корсакова, Ю.С. Хохлов, У.И. Канцаева // Бюлл. ГНБС. – 2017. – Вып. 124. – С. 77–81.
48. Корсакова, С.П. Динамика временных границ климатических сезонов на Южном берегу Крыма в условиях изменения климата / С.П. Корсакова, П.Б. Корсаков // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2018о. – Вып. 127. – С. 107–115.
49. Корсакова, С.П. Реакция многолетних эфиромасличных культур на изменения климата в условиях Южного берега Крыма / С.П. Корсакова // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2018е. – Т. 146. – С. 61–71.
50. Корсакова, С.П. Зависимость фотосинтеза *Juniperus excelsa* M.Bieb от факторов среды в оптимальных условиях увлажнения и в условиях почвенной засухи / С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий, А.В. Паштецкий // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2018р. – Вып. 4(73). – С. 118–122.
51. Корсакова, С.П. Фенологические модели сроков зацветания *Thymus vulgaris* L. и *Thymus mastichina* L. на Южном берегу Крыма / С.П. Корсакова // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2018ж. – Вып. 4(73). – С. 112–118.
52. Корсакова, С.П. Оценка биологической эффективности климата на территории заповедника «Мыс Мартыан» в условиях глобального потепления / С.П. Корсакова // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартыан». – 2018к. – № 9. – С. 58–60.
53. Гиль, А.Т. Фитоклимат дуба пушистого и можжевельника высокого в условиях южного берега Крыма / А.Т. Гиль, С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартыан». – 2018. – № 9. – С. 49–50.
54. Корсакова, С.П. Применение фитомониторных систем для оптимизации интродукционных исследований / С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий, Ю.В. Плугатарь, А.В. Паштецкий // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2018с. – Т. 147. – С. 80–82.

Материалы международных конференций:

55. Корсакова, С.П. Изучение компонентного состава эфирного масла некоторых видов чабреца, интродуцированных в ГНБС / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов, Д.И. Фурса, Б.А. Виноградов // Проблемы дендрологии, цветоводства, плодородства, виноградарства и виноделия : материалы IV Международной конференции (Ялта, 14–16 октября 1996 г.). – Ялта : [б. и.], 1996а. – Т. 1. – С. 90–93.
56. Корсакова, С.П. Изучение биологии прорастания семян рода Чабрец при интродукции на Южном берегу Крыма / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов, Д.И. Фурса, Л.А. Хлыпенко // Проблемы дендрологии, цветоводства, плодородства, виноградарства и виноделия : материалы IV Международной конференции (Ялта, 14–16 октября 1996 г.). – Ялта : [б. и.], 1996б. – Т. 1. – С. 94–96.
57. Корсакова, С.П. О влиянии погодных условий на накопление эфирного масла у чабреца в период активной вегетации / С.П. Корсакова // Проблемы дендрологии, цветоводства, плодородства. Часть II, Цветоводство : материалы V Международной конференции (Ялта, 6–10 октября, 1997 г.). – Ялта : [б. и.], 1997в. – С. 44–48.
58. Корсакова, С.П. О перспективах интродукции новых видов чабреца / С.П. Корсакова, Д.И. Фурса, В.Д. Работягов // Современные проблемы научных исследований и развития садоводства, субтропического растениеводства и цветоводства : тезисы докладов Международной конференции молодых ученых (Сочи, 21–25 сентября 1999 г.). – Сочи: Всероссийский научно-исследовательский институт цветоводства и субтропических культур РАСХН, 1999. – С. 17–18.
59. Корсакова, С.П. Изучение морфологических особенностей межвидовых гибридов *Thymus* L. / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов // Изучение онтогенеза растений природных и культурных флор в ботанических учреждениях и дендропарках Евразии : материалы XII Международной научной конференции (Полтава, 1 сентября 2000 г.). – Полтава : издательство Тетта, 2000б. – С. 168–170.
60. Работягов, В.Д. Изучение биохимических особенностей *Thymus* L. / В.Д. Работягов, С.П. Корсакова, // Изучение онтогенеза растений природных и культурных флор в ботанических учреждениях и дендропарках Евразии : материалы XII Международной научной конференции (Полтава, 1 сентября 2000 г.). – Полтава : издательство Тетта, 2000. – С. 266–268.
61. Корсакова, С.П. Изучение эколого-биологических особенностей *Thymus* L. на Южном берегу Крыма / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов // Тезисы VII Международной конференции ботаников в Санкт-Петербурге (Санкт-Петербург, 15–19 мая 2000 г.). – Санкт-Петербург, 2000в. – С. 231.
62. Корсакова, С.П. Биологический минимум температур воздуха в период формирования генеративных органов *Th. vulgaris* L. и *Th. camphoratus* Hoff. et Link / С.П. Корсакова // Современные научные исследования в садоводстве. Часть. 3. : материалы VIII Международной конференции по садоводству (Ялта 11–13 сентября 2000 г.). – Ялта : [б. и.], 2000г. – С. 30–35.
63. Корсакова, С.П. Зависимость интенсивности накопления тимола в эфирном масле *Thymus* L. от температуры воздуха и влагозапасов почвы в период цветения / С.П. Корсакова // Обмен опытом гидрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства Украины в современных условиях : материалы совещания-семинара (Ялта, 15–20 октября 2001 г.) – Киев : [б. и.], 2001б. – С.90–91.
64. Корсакова, С.П. Влияние генетических и климатических факторов на биосинтез тимола в эфирном масле *Thymus* L. / С.П. Корсакова, В.Д. Работягов // Интродукция и селекция ароматических и лекарственных растений : тезисы Международной научно-практической конференции (Ялта 8–12 июня 2009 г.). – Ялта : [б. и.], 2009. – С. 85–86.
65. Ильницкий, О.А. Исследование засухоустойчивости некоторых видов кустарников нижнего яруса в условиях арборетума Никитского ботанического сада / О.А. Ильницкий, Ю.В. Плугатарь, М.С. Ковалев, С.П. Корсакова // VI открытый съезд фитобиологов Причерноморья. Секция 4. «Интродукция растений» : сборник докладов (Херсон-Лазурное, 19 мая 2015 г.). – Херсон : ХДУ, 2015а. – С. 119–121.
66. Ильницкий, О.А. Влияние «кислотных осадков» на растительный мир Южного берега Крыма / О.А. Ильницкий, С.П. Корсакова, Ю.В. Плугатарь // VI открытый съезд фитобиологов Причерноморья. Секция 2. «Флора и растительность, охрана растительного мира» : сборник докладов (Херсон-Лазурное, 19 мая 2015 г.). – Херсон : ХДУ, 2015б г. – С. 57–59.

67. Плугатарь, Ю.В. Световой режим в подкроновом пространстве древесных растений парка Никитского ботанического сада / Ю.В. Плугатарь, М.С. Ковалев, О.А. Ильницкий, С.П. Корсакова // Роль ботанических садов в сохранении и мониторинге биоразнообразия. Секция №5. Экологический мониторинг состояния почв и экосистем : материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, 27-30 мая 2015 г.). Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2015е. – С. 640–641.
68. Корсакова, С.П. Сравнительная оценка фотосинтетической активности вечнозеленых декоративных растений на Южном берегу Крыма / С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий, Ю.В. Плугатарь // Биотехнология как инструмент сохранения биоразнообразия растительного мира (физиолого-биохимические, эмбриологические, генетические и правовые аспекты) : материалы VII Международной научно-практической конференции (Ялта, 25 сентября – 1 октября, 2016). – Симферополь : ИТ «АРИАЛ». – 2016. – С. 172–173.
69. Ильницкий, О.А. Применение методологии и приборной базы фитомониторинга в научных исследованиях в заповедниках и национальных парках России / О.А. Ильницкий, Ю.В. Плугатарь, С.П. Корсакова // Научные исследования в заповедниках и национальных парках России : Тезисы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Петрозаводск, 29 августа – 4 сентября 2016 г.). – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2016а. – С. 89–90.
70. Паштецкий, А.В. Зависимость фотосинтеза у *Laurus nobilis* L. от факторов среды в норме и в условиях почвенной засухи / А.В. Паштецкий, С.П. Корсакова, Ю.В. Плугатарь, О.А. Ильницкий // Проблемы и перспективы развития современной ландшафтной архитектуры : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Симферополь, 25-28 сентября 2017 г.). – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2017б. – С. 231–235.
71. Корсакова, С.П. Сравнительная характеристика устойчивости *Nerium oleander* L., *Laurus nobilis* L. и *Aucuba japonica variegata* Thunb. к почвенной засухе / С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий // Современные технологии в изучении биоразнообразия и интродукции растений : материалы Международной научной конференции (Ростов-на-Дону, 17-21 октября 2017 г.). – Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017в. – С. 149–151.
72. Корсакова, С.П. Особенности формирования индивидуального режима фитоклимата внутри кроны *Quercus pubescens* Willd. и *Juniperus excelsa* M.Bieb. / С.П. Корсакова, А.В. Паштецкий, О.А. Ильницкий // Биоразнообразие: подходы к изучению и сохранению: материалы Международной научной конференции (Тверь, 8-11 ноября 2017 г.). – Тверь: Тверской государственный университет, 2017г. – С. 179–183.
73. Корсакова, С.П., Особенности водного обмена *Laurus nobilis* L. и *Aucuba japonica variegata* Thunb. в условиях прогрессирующей почвенной засухи / С.П. Корсакова, О.А. Ильницкий // Проблемы и перспективы развития современной ландшафтной архитектуры : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Симферополь, 25-28 сентября 2017 г.). – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2017д. – С. 215–219.
74. Корсакова, С.П. Особенности фенологических реакций древесных растений Южного берега Крыма на изменения климата / С.П. Корсакова, П.Б. Корсаков // Экология и география растений и растительных сообществ : материалы IV Международной научной конференции (Екатеринбург, 16-19 апреля 2018 г.). – Екатеринбург : Издательство Уральского университета ; Гуманитарный университет, 2018и. – С. 476–479.
75. Pashtetsky, A. Using of phytomonitoring data for eco-physiological evaluation of the environmental factors limiting development of ornamental plants / A. Pashtetsky, Yu. Plugatar, O. Ilnitsky, S. Korsakova // 30TH International horticultural congress, ISHS-2018, Symposium 15. Ornamental Horticulture: Color Your World, (Istanbul, Turkey, August 12-16, 2018). – Istanbul, 2018. – P. 6.
76. Marko, N. Phenological response to the climate change of oil-bearing rose under subtropical conditions of the Southern coast of the Crimea / N. Marko, S. Korsakova // 30TH International horticultural congress, ISHS-2018 Symposium 16 International Symposium on Tropical and Subtropical Vegetable Production : Tackling Present and Future Global Biotic and Abiotic Stressors, (Istanbul, Turkey, August 12-16, 2018). – Istanbul, 2018. – P. 29.