



Продовольственная и  
сельскохозяйственная организация  
Объединенных Наций



Международная  
конвенция по карантину  
и защите растений

# Научный обзор влияния изменения климата на вредные для растений организмы

**Глобальная задача по  
предотвращению и смягчению  
фитосанитарных рисков в сельском  
хозяйстве, лесном хозяйстве и  
экосистемах**





# Научный обзор влияния изменения климата на вредные для растений организмы

**Глобальная задача по  
предотвращению и смягчению  
фитосанитарных рисков в сельском  
хозяйстве, лесном хозяйстве и  
экосистемах**

**Авторы-составители: Мария Лодовика Гуллино (ведущий автор, Италия), Рамон Альбахес (Испания), Ибрагим аль-Джбури (Ирак), Франсислене Анжелотти (Бразилия), Субрата Чакраборти (Австралия), Карен А. Гарретт (Соединенные Штаты Америки), Бретт Филлип Херли (Южная Африка), Петер Юрошек (Германия), Халед Маккук (Ливан), Сюйбинь Пань (Китай), Таннесия Стивенсон (Ямайка).**

**Продовольственная и сельскохозяйственная организация  
Объединенных Наций  
Рим, 2021 г.**

#### Обязательная ссылка:

Секретариат МККЗР. 2021. *Научный обзор влияния изменения климата на вредные для растений организмы: глобальная задача по предотвращению и смягчению фитосанитарных рисков в сельском хозяйстве, лесном хозяйстве и экосистемах*. Рим. ФАО от имени Секретариата Международной конвенции по карантину и защите растений. <https://doi.org/10.4060/cb4769ru>

Используемые обозначения и представление материала в настоящем информационном продукте не означают выражения какого-либо мнения со стороны Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций относительно правового статуса или уровня развития той или иной страны, территории, города или района, или их властей, или относительно делимитации их границ или рубежей. Упоминание конкретных компаний или продуктов определенных производителей, независимо от того, запатентованы они или нет, не означает, что ФАО одобряет или рекомендует их, отдавая им предпочтение перед другими компаниями или продуктами аналогичного характера, которые в тексте не упоминаются.

Мнения, выраженные в настоящем информационном продукте, являются мнениями автора (авторов) и не обязательно отражают точку зрения или политику ФАО.

ISBN 978-92-5-134494-1

© ФАО, 2021



Некоторые права защищены. Настоящая работа предоставляется в соответствии с лицензией Creative Commons «С указанием авторства – Некоммерческая - С сохранением условий 3.0 НПО» (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.ru>).

Согласно условиям данной лицензии настоящую работу можно копировать, распространять и адаптировать в некоммерческих целях при условии надлежащего указания авторства. При любом использовании данной работы не должно быть никаких указаний на то, что ФАО поддерживает какую-либо организацию, продукты или услуги. Использование логотипа ФАО не разрешено. В случае адаптации работы она должна быть лицензирована на условиях аналогичной или равнозначной лицензии Creative Commons. В случае перевода данной работы, вместе с обязательной ссылкой на источник, в него должна быть включена следующая оговорка: «Данный перевод не был выполнен Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО). ФАО не несет ответственности за содержание или точность данного перевода. Достоверной редакцией является издание на [указать язык оригинала] языке».

Возникающие в связи с настоящей лицензией споры, которые не могут быть урегулированы по обоюдному согласию, должны разрешаться через посредничество и арбитражное разбирательство в соответствии с положениями Статьи 8 лицензии, если в ней не оговорено иное. Посредничество осуществляется в соответствии с «Правилами о посредничестве» Всемирной организации интеллектуальной собственности <http://www.wipo.int/amc/ru/mediation/rules/index.html>, а любое арбитражное разбирательство должно производиться в соответствии с «Арбитражным регламентом» Комиссии Организации Объединенных Наций по праву международной торговли (ЮНСИТРАЛ).

Материалы третьих лиц. Пользователи, желающие повторно использовать материал из данной работы, авторство которого принадлежит третьей стороне, например, таблицы, рисунки или изображения, отвечают за то, чтобы установить, требуется ли разрешение на такое повторное использование, а также за получение разрешения от правообладателя. Удовлетворение исков, поданных в результате нарушения прав в отношении той или иной составляющей части, авторские права на которую принадлежат третьей стороне, лежит исключительно на пользователе.

Продажа, права и лицензирование. Информационные продукты ФАО размещаются на веб-сайте ФАО ([www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)); желающие приобрести информационные продукты ФАО могут обращаться по адресу: [publications-sales@fao.org](mailto:publications-sales@fao.org). По вопросам коммерческого использования следует обращаться по адресу: [www.fao.org/contact-us/licence-request](http://www.fao.org/contact-us/licence-request). За справками по вопросам прав и лицензирования следует обращаться по адресу: [copyright@fao.org](mailto:copyright@fao.org).

Этот документ не является официальной юридической интерпретацией Международной конвенции по карантину и защите растений (МККЗР) или связанных с ней документов и был разработан только в информационных целях. Для перевода этого материала, пожалуйста, обратитесь по адресу: [iprc@fao.org](mailto:iprc@fao.org), чтобы получить информацию по договору о совместной публикации.

# Содержание

◆ Предисловие	v
◆ Выражение признательности	vi
◆ Аббревиатуры	vii
◆ Краткое резюме	ix
 <b>Введение</b>	<b>1</b>
<i>Воздействие изменения климата на сельское хозяйство, лесное хозяйство и экосистемы</i>	2
<i>Вредные организмы, наносящие ущерб сельскохозяйственным культурам, лесному хозяйству и экосистемам в глобальном масштабе</i>	8
<i>Пути распространения, используемые вредными организмами</i>	9
<i>Подходы к изучению влияния изменения климата на вредные для растений организмы</i>	13
 <b>Влияние изменения климата на вредные для растений организмы</b>	<b>20</b>
<i>Имитационное моделирование будущего фитосанитарного риска</i>	21
<i>Влияние на виды вредных организмов</i>	22
<i>Анализ конкретных примеров по отдельным видам вредных организмов</i>	24
 <b>Профилактика, смягчение последствий и адаптация</b>	<b>36</b>
<i>Профилактические меры</i>	37
<i>Последние технические достижения</i>	41
<i>Смягчение последствий и адаптация</i>	43
 <b>Выводы и рекомендации</b>	<b>45</b>
<i>Вопросы разработки политики и нормативно-правового регулирования</i>	46
<i>Необходимые исследования</i>	47
<i>Международное сотрудничество</i>	49
<i>Наращивание потенциала</i>	50
<b>Библиография</b>	52



# Предисловие



**И**зменение климата представляет собой беспрецедентный вызов для биосферы планеты и глобального сообщества. Это ни с чем не сравнимая угроза для биоразнообразия Земли, здоровья человека и мировой экономики. Кроме того, это уникальная проблема в сфере охраны здоровья растений. Изменение климата отразится на экосистемах и системах сельскохозяйственного производства во всем мире. Оно повлияет на международные торговые потоки сельскохозяйственных продуктов и изменит инвазионную способность, степень воздействия и распространенность вредных организмов по всему миру. Изменение климата, в частности, станет исключительным испытанием для международного сообщества, обеспечивающего здоровье растений, и его способности решительно выступать против таких вызовов единым фронтом, используя научный подход.

Международный год охраны здоровья растений (МГОЗР) 2020 стал попыткой повысить уровень общественной и политической осведомленности о здоровье растений и оказать содействие правительствам и международному сообществу в преодолении проблем, связанных с охраной здоровья растений. Одна из важных проблем в сфере охраны здоровья растений, которую необходимо решить, – это последствия изменения климата. Для этой цели Международный руководящий комитет по проведению МГОЗР поручил провести научный обзор по этой теме. Для укрепления научной основы обзора Международный руководящий комитет собрал группу авторов со всего мира в составе авторитетных ученых и создал систему строгого рецензирования для проверки результатов обзора. В настоящем докладе, подготовленном ведущим автором профессором Марией Лодовикой Гуллино (Туринский университет, Италия) и группой из десяти соавторов – представителей всех регионов ФАО, обладающих знаниями и опытом в области фитопатологии, энтомологии, гербологии, климатологии и анализа данных, подробно описываются результаты обзора. Научный обзор проводился под эгидой Секретариата Международной конвенции по карантину и защите растений (МККЗР).

Международный руководящий комитет по проведению МГОЗР надеется, что данный научный обзор влияния изменения климата на вредные организмы и, как следствие, на здоровье растений, послужит научной основой, необходимой для успешного обсуждения оценки последствий изменения климата и адаптации к ним на международных фитосанитарных совещаниях. Международный руководящий комитет по проведению МГОЗР надеется, что данный обзор подтолкнет Комиссию по фитосанитарным мерам МККЗР к обсуждению и разработке международных стратегий смягчения последствий изменения климата для здоровья растений. Этот обзор рассматривается в качестве первого шага на пути к реализации пункта повестки дня в области развития «Оценка последствий изменения климата для здоровья растений и адаптация к ним» Стратегической рамочной программы МККЗР на 2020-2030 годы. Мы искренне надеемся и рассчитываем, что данный обзор вызовет решительную и согласованную реакцию международного сообщества на проблемы, которые изменение климата представляет для здоровья растений.


С уважением,

**Ральф Лопиан**

*Председатель Международного руководящего комитета по проведению МГОЗР 2020*



# Выражение признательности

 **М**ария Лодовика Гуллино выражает признательность финансируемым Еврокомиссией проектам «Биозащита растений и пищевых продуктов» (PLANTFOODSEC, грант № 261751), «Эффективная борьба с вредными организмами и опасными чужеродными видами – Интегрированные решения» (EMPHASIS, грант № 634179) и «Европейско-китайский инструмент демонстрации ИЗР» (EUCLID, грант № 633999). **Рамон Альбахес** также выражает признательность проектам EMPHASIS и EUCLID. **Петер Юрошек** выражает признательность проекту «Потенциальное среднесрочное и долгосрочное воздействие прогнозируемого изменения климата на болезни растений и на эффективность применения фунгицидов при обработке полевых культур в Германии» (SIMKLIMA), грант (№ FKZ 281B202616) на реализацию которого был выделен Бенно Кляйнхенцу и финансовую поддержку которому на основании решения Парламента Федеральной Республики Германия оказывает Федеральное министерство продовольствия и сельского хозяйства через Федеральное бюро по продовольствию и сельскому хозяйству в рамках программы поддержки инноваций. **Суйбинь Пань** благодарит за поддержку Консультационный проект Китайской академии инженерных наук (грант № 2019-ZD-4).

Также выражается признательность **Стефании Антро** (Агроиннова, Туринский университет) за ценную и квалифицированную техническую поддержку. Кроме того, авторы хотят отметить непрерывную поддержку и помощь со стороны **Вииви Кувая** (Секретариат МККЗР, ФАО) и полезные предложения авторов обзора в процессе подготовки настоящего документа.

Настоящий доклад был подготовлен с участием ряда экспертов из следующих отделов ФАО: Отдела по растениеводству и защите растений, Отдела лесного хозяйства, Отдела земельных и водных ресурсов, а также Управления по изменению климата, биоразнообразию и окружающей среде.



# Аббревиатуры

- ◆ **АФР** Анализ фитосанитарного риска
- ◆ **ДНК** дезоксирибонуклеиновая кислота
- ◆ **КГМСХИ** Консультативная группа по международным сельскохозяйственным исследованиям
- ◆ **МГОЗР** Международный год охраны здоровья растений
- ◆ **МГЭИК** Межправительственная группа экспертов по изменению климата
- ◆ **МККЗР** Международная конвенция по карантину и защите растений
- ◆ **МСФМ** Международный стандарт по фитосанитарным мерам
- ◆ **НОКЗР** Национальная организация по карантину и защите растений
- ◆ **ТР4** Тропическая раса 4 (*Fusarium oxysporum*)
- ◆ **ФАО** Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций
- ◆ **CLIMEX** Климатическое моделирование экстремальных явлений
- ◆ **COVID-19** Коронавирусная инфекция COVID-2019
- ◆ **FACE** Обогащение атмосферного воздуха углекислым газом
  
- ◆ **C<sub>3</sub>** Соединение с тремя атомами углерода, получаемое в процессе фотосинтеза
- ◆ **C<sub>4</sub>** Соединение с четырьмя атомами углерода, получаемое в процессе фотосинтеза
- ◆ **CH<sub>4</sub>** Метан
- ◆ **CO<sub>2</sub>** Углекислый газ
- ◆ **N<sub>2</sub>O** Закись азота



# Краткое резюме



Изменение климата по-прежнему создает трудности для жизни и обеспечения средствами к существованию по всему миру и умножает проблемы, с которыми человечество уже сейчас сталкивается. Настоящий доклад посвящен потенциальному воздействию изменения климата на вредные для растений организмы и, как следствие, на состояние здоровья растений, исходя из анализа научной литературы и исследований, в которых такие аспекты изучались. Вредный для растений организм, далее именуемый «вредный организм», – это любой вид, разновидность или биотип растений, животных или патогенных агентов, вредный для растений или растительных продуктов. Исторические и современные примеры четко показывают значительный ущерб, к которому могут привести очаги вредных организмов. Потепление климата упрощает интродукцию нежелательных организмов. Одной единственной необычайно теплой зимы может быть достаточно для облегчения акклиматизации инвазивных вредных организмов, которые, в противном случае, не смогли бы этого сделать. И действительно, растущая глобализация рынков в последние годы наряду с возросшими температурами привела к ситуации, чрезвычайно благоприятной для перемещения и акклиматизации вредных организмов, с сопутствующим увеличением риска губительных последствий для лесов и сельскохозяйственных культур.

Проведена оценка влияния ряда атмосферных и климатических факторов, включая повышение температуры, углекислый газ, озон и изменение водного режима / режима влажности, на распространенность, присутствие и численность вредных организмов, а также на серьезность представляемого ими фитосанитарного риска. Большая часть исследований посвящена управляемым системам (например, сельскохозяйственным и плодовым культурам, лесным деревьям), тогда как неуправляемые системы в той или иной степени оставлены без внимания. Использовалось много различных научно-исследовательских подходов, начиная с проведения лабораторных и полевых экспериментов и заканчивая моделированием будущих фитосанитарных рисков.

Большая часть исследований, проведенных с использованием зерновых или плодовых культур, демонстрирует, что, в целом, фитосанитарный риск, представляемый насекомыми, патогенами и сорными растениями, возрастет в сельскохозяйственных системах в условиях изменения климата, особенно в современных более прохладных арктических, северных, умеренных и субтропических регионах. В значительной мере это также относится к патогенам и насекомым-вредителям в лесном хозяйстве. В отношении неуправляемых систем доступны результаты всего лишь нескольких исследований, и поэтому невозможно сделать общие выводы.

Необходимо принимать профилактические меры, меры по смягчению последствий, а также меры по адаптации, с целью ограничения международного распространения вредных организмов в процессе торговли и при перемещении людей. В их число входит целый ряд мер, начиная с фитосанитарных мер, таких как здоровый семенной и посадочный материал, и заканчивая внедрением последних технических достижений, таких как инновационные методы доставки пестицидов. Кратко- и среднесрочные способы смягчения последствий и адаптации включают использование устойчивых сортов и изменение микроклимата.

Несмотря на многочисленные исследования в области воздействия изменения климата на биологические процессы, по-прежнему сохраняются пробелы в изучении влияния изменения климата на вредные для растений организмы и, как следствие, на состояние здоровья растений. Эти пробелы включают воздействие изменения климата на эффективность стратегий борьбы, на обитающие под землей вредные организмы, а также на лесное хозяйство и неуправляемые экосистемы. Необходим долгосрочный междисциплинарный подход для решения проблем развивающихся и промышленно развитых стран. Необходимо активизировать международное сотрудничество и, кроме того, выделять финансирование на наращивание потенциала с целью обеспечения устойчивых систем по анализу фитосанитарного риска, надзору и мониторингу.

Итак, рассматриваемые в настоящем докладе данные убедительно свидетельствуют о том, что во многих случаях изменение климата приведет к усугублению проблем, связанных со здоровьем растений, в управляемых (например, сельское хозяйство, садоводство, лесное хозяйство), полууправляемых (например, национальные парки) и, предположительно, в неуправляемых экосистемах. Из-за климатических изменений недавнего времени уже сейчас необходимо вносить коррективы в протоколы по защите растений, а в будущем еще большее значение приобретет дальнейшая корректировка при условии реализации прогнозируемых сценариев изменения климата. Первостепенную важность в условиях изменения климата имеет обеспечение предоставления услуг и выпуска продукции в сфере управляемых и неуправляемых экосистем, в том числе производство продовольствия. Защита растений в части профилактики и оздоровления представляет собой один из ключевых компонентов, необходимых для обеспечения и сохранения продовольственной безопасности в настоящем и будущем.

*Операции по борьбе с пустынной саранчой на Африканском Роге*



© FAO/Louis Taro

# Введение





## Воздействие изменения климата на сельское хозяйство, лесное хозяйство и экосистемы

Цель настоящего обзора – дать оценку потенциальных воздействий изменения климата на вредные для растений организмы и, как следствие, на здоровье растений. Вредный для растений организм, далее именуемый «вредный организм», – это любой вид, разновидность или биотип растений, животных или патогенных агентов, вредный для растений или растительных продуктов, в соответствии с определением, приведенным в Международном стандарте по фитосанитарным мерам (МСФМ 5), который был утвержден Комиссией по фитосанитарным мерам Международной конвенции по карантину и защите растений (МККЗР).

Изменение климата определяется как увеличение совокупных температур воздуха у поверхности земли и температур поверхности моря, усредненных по всему миру за 30-летний период. Потепление выражается по отношению к периоду 1850-1900 гг., используемому для определения приближенного значения доиндустриальных температур. Тенденция потепления с доиндустриальных уровней по сравнению с десятилетием 2006-2015 гг. оценивается в 0,87 °C. С 2000 года оценочный уровень вызванного антропогенными факторами потепления соответствует уровню наблюдаемого потепления в пределах  $\pm 20$  процентов с учетом неопределенности, связанной с солнечной и вулканической активностями в течение исторического периода (IPCC, 2018). Климатические модели демонстрируют устойчивые различия в характеристиках регионального климата между сегодняшним днем и условиями при глобальном потеплении на 1,5 °C, а также между потеплением на 1,5 и 2,0 °C. Эти различия заключаются в увеличении следующих показателей: средней температуры в большинстве регионов суши и океана, экстремально жаркой погоды в большинстве населенных районов, сильных атмосферных осадков в ряде регионов, а также вероятности засухи и нехватки атмосферных осадков в некоторых регионах (IPCC, 2018).

Изменение климата по-прежнему создает проблемы для жизни и обеспечения средствами к существованию по всему миру (Altizer *et al.*, 2013; IPCC, 2018). Наблюдаемые изменения включают в себя увеличение глобальных температур над сушей и океаном (рис. 1), потерю ледяных щитов и снежного покрова, повышение уровня моря, усиление закисления океана, более частые экстремумы тепла, более переменный характер распределения осадков и учащение случаев выпадения обильных осадков и засух (рис. 2). Эти изменения объясняются увеличением антропогенных выбросов парниковых газов с доиндустриального периода из-за интенсификации сельскохозяйственной и промышленной деятельности, сжигания ископаемых видов топлива и изменений в землепользовании (рис. 3 и 4). Химический анализ льда и осадочных пород показывает, что концентрации углекислого газа (CO<sub>2</sub>), метана (CH<sub>4</sub>) и закиси азота (N<sub>2</sub>O) в атмосфере выросли до уровней, являющихся беспрецедентными, по меньшей мере, за последние 800 000 лет.

Их воздействие, наряду с воздействием других антропогенных факторов, таких как обезлесение, является основной причиной потепления, наблюдаемого с середины двадцатого века (МГЭИК, 2014а, 2014б, IPCC 2018; Wuebbles and Nauho, 2002). Важно отметить, что глобальное изменение климата, особенно глобальное потепление, по всей вероятности, продолжится. По данным Специального доклада МГЭИК по глобальному потеплению, глобальное потепление, вероятно, достигнет увеличения на 1,5 °C<sup>1</sup> в период между 2030 и 2052 годами по сравнению с доиндустриальными уровнями, если сохранятся текущие темпы потепления (IPCC 2018). Риски, связанные с изменением климата, выше в случае

<sup>1</sup> Цель Парижского соглашения (2015 г.) – удержать глобальное потепление в пределах значительно меньше 2 °C, желательнее до 1,5 °C, по сравнению с доиндустриальными уровнями.

глобального потепления на 1,5 °С по сравнению с текущими рисками<sup>2</sup>, однако в случае глобального потепления на 2 °С риски – гораздо серьезнее. Риски зависят от степени и темпов потепления, географического местоположения, уровней регионального и местного развития и уязвимости, а также от проводимых мероприятий по адаптации и смягчению последствий (IPCC, 2018).

Изменение климата уже оказывает влияние на природные и человеческие системы, в том числе оно становится причиной изменения количества и качества воды, и для многих наземных, пресноводных и морских видов – причиной сдвигов в географических ареалах, сезонной активности, характере миграции, численности видов и во взаимодействии с другими видами (МГЭИК, 2014), при этом влияние на урожайность большинства сельскохозяйственных культур носит скорее отрицательный, чем положительный, характер (Porter *et al.*, 2019). Есть основания полагать, что изменение климата влияет на биологические системы на различных уровнях, начиная с генов и заканчивая экосистемами (Garrett *et al.*, 2006; Sutherst *et al.*, 2011). По данным Scheffers *et al.* (2016), изменение климата, обусловленное антропогенными факторами, негативно сказалось на 82-х процентах 94-х основных различаемых биологами экологических процессов – от генетического разнообразия до функционирования экосистем.

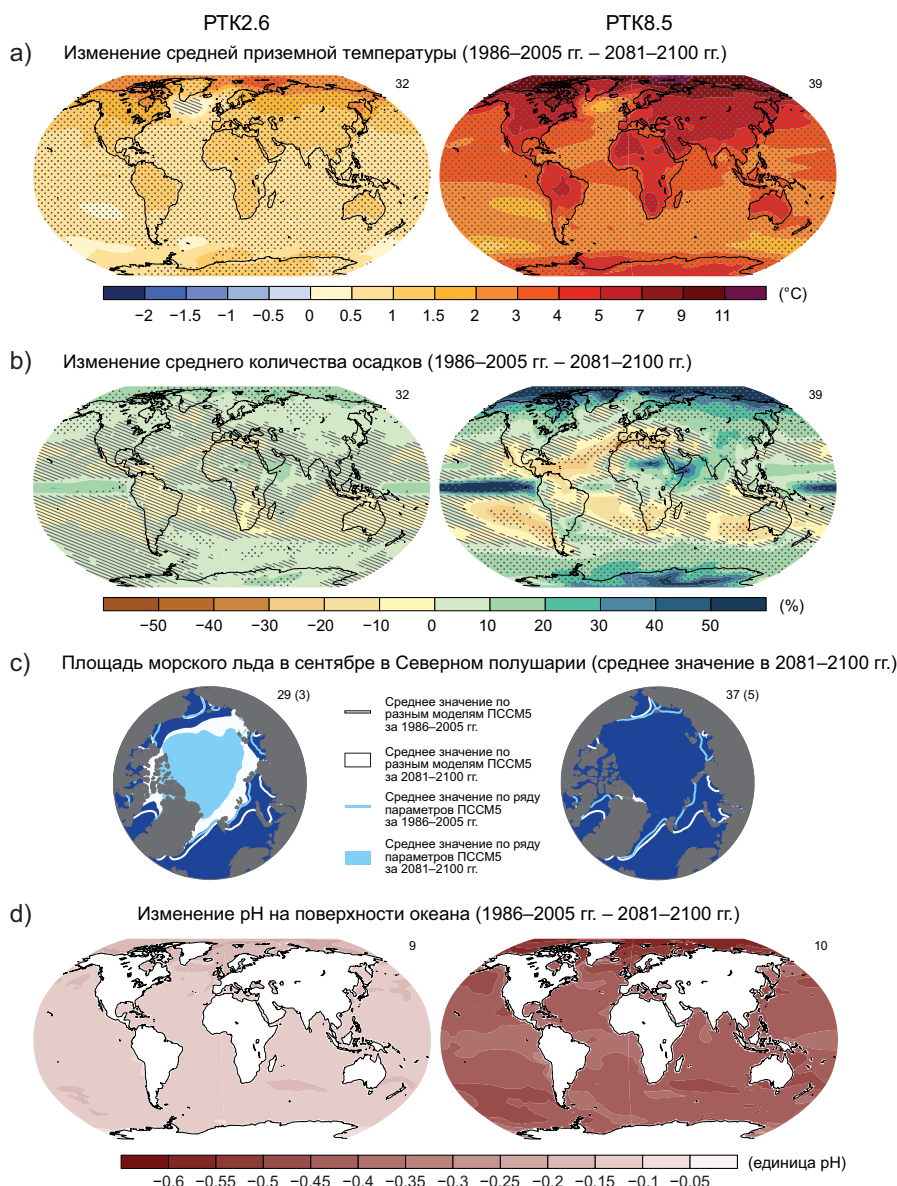
Более того, в двадцать первом веке и в последующий период умножатся уже существующие риски, в частности, нехватка пресной воды, и возникнут новые риски. К будущим последствиям относится возросший риск вымирания. Например, большинство видов растений не может естественным образом менять свой ареал достаточно быстро, чтобы не отставать от скорости изменения климата, а морские организмы столкнутся со снижением концентрации кислорода и с увеличением закисления, к чему они, возможно, не смогут приспособиться. Дальнейшее изменение климата также может представлять угрозу для продовольственной безопасности ввиду воздействия на продовольственные культуры и корма для животных растительного происхождения. Ожидается, что наихудшее воздействие на пшеницу, рис и кукурузу будет иметь место в тропиках и субтропиках, при этом прогнозируется отрицательное воздействие изменения климата на производство в регионах, где температура повысится на 2 °С или более по сравнению с уровнями конца двадцатого века, хотя некоторые отдельные места могут получить преимущества благодаря такому изменению, особенно в более высоких широтах и на большей высоте над уровнем моря. Также пострадают общемировое производство продовольственных и технических культур, защита растений и биозащита растений, которые включают все стратегии оценки рисков, представляемых инфекционными болезнями, карантинными регулируемые вредными организмами, инвазивными чужеродными видами, живыми модифицированными организмами в естественных и управляемых экосистемах, и управления этими рисками (Gregory *et al.*, 2009; Stack, Fletcher and Gullino, 2013).

Цель настоящего доклада – предоставить информацию о том, (i) что произошло за последние десятилетия; (ii) что, как ожидается, произойдет в предстоящие десятилетия в результате изменения климата; и (iii) что мы можем сделать для смягчения последствий и адаптации к изменению климата на местном, региональном и глобальном уровнях.

Рассмотрение причин изменения климата или предоставление всестороннего обзора всех результатов, опубликованных за последние 30 лет, не входит в рамки настоящего доклада. Вместо этого приводится множество примеров публикаций для дальнейшего подробного изучения.

<sup>2</sup> В соответствии со Специальным докладом МГЭИК по глобальному потеплению на 1,5 °С деятельность человека уже стала причиной глобального потепления приблизительно на 1,0 °С по сравнению с доиндустриальными уровнями.

Рисунок 1



Источник: IPCC (2013).

Следующее оригинальное полное описание рис. 1 опубликовано в IPCC (2013):

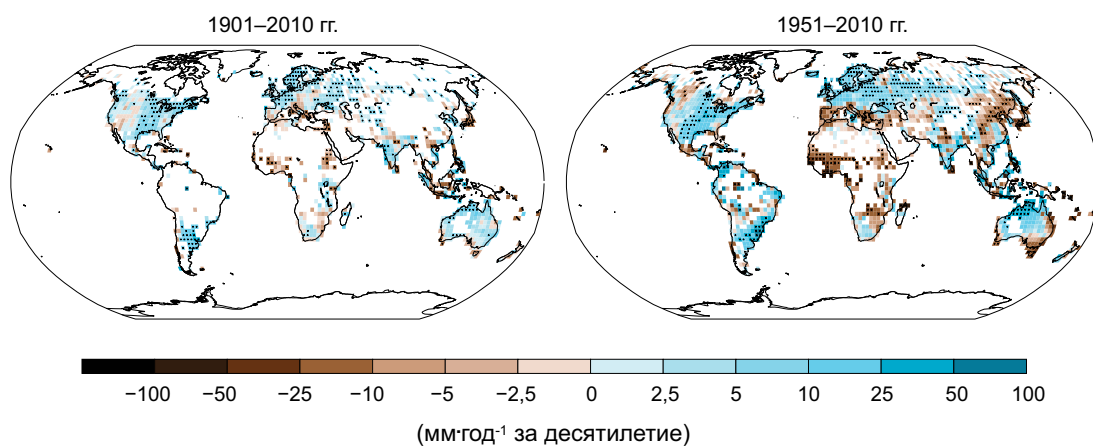
Рисунок РП.8. Карты средних значений, полученных по моделям ПССМ5 в рамках сценариев РТК2.6 и РТК8.5 для 2081–2100 гг., (а) среднегодового изменения приземной температуры; (б) среднего процента изменений среднегодового количества осадков; (в) площади морского льда в сентябре в Северном полушарии и (г) изменения рН на поверхности океана. Изменения в частях «а», «б» и «г» показаны по сравнению с 1986–2005 гг. Количество моделей ПССМ5, использованных для расчета среднего по модельному ансамблю значения, указано в верхнем правом углу каждой части. В частях «а» и «б» штриховкой показаны регионы, для которых среднее модельное значение мало по сравнению с естественной внутренней изменчивостью (т. е. менее одного стандартного отклонения естественной внутренней изменчивости 20-летних средних). Точечной штриховкой обозначены регионы, в которых среднее модельное значение велико по сравнению с естественной внутренней изменчивостью (т. е. более двух стандартных отклонений естественной внутренней изменчивости 20-летних средних) и по которым среди 90 % моделей есть согласие в отношении знака изменений (см. вставку 12.1). В части «с» линии представляют полученные по моделям средние значения за 1986–2005 гг.; закрашенные области относятся к концу столетия. Среднее значение по ансамблю моделей ПССМ5 показано белым цветом, а голубым цветом показана прогнозируемая средняя площадь морского льда по подгруппе моделей (количество моделей приводится в скобках), наиболее точно воспроизводящих среднее климатическое состояние и тренд площади морского льда в Арктике в 1979–2012 гг. Дополнительную техническую информацию см. в дополнительном материале к Техническому резюме. {Рисунки 6.28, 12.11, 12.22 и 12.29; рисунки ТР.15, ТР.16, ТР.17 и ТР.20}

Больше информации можно найти в оригинальном источнике (IPCC, 2013). Публикуется с любезного разрешения Межправительственной группы экспертов по изменению климата.



## Рисунок 2

### Наблюдаемые изменения годового количества осадков над сушей



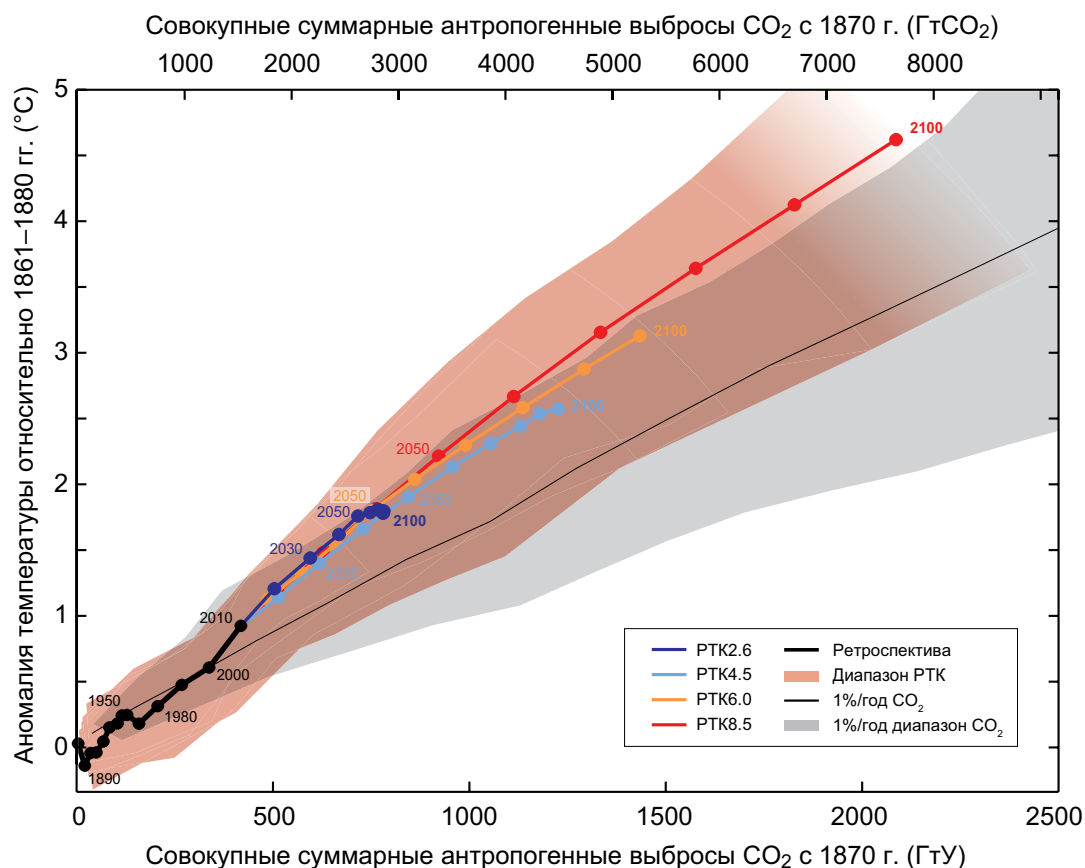
Источник: IPCC (2013).

Следующее оригинальное полное описание рис. 2 опубликовано в IPCC (2013):

Рисунок РП.2. Карты наблюдаемого изменения количества осадков с 1901 по 2010 гг. и с 1951 по 2010 гг. (тренды ежегодного аккумулярования, рассчитанные с использованием тех же критериев, что и на рисунке РП.1) по одному массиву данных. Более подробную техническую информацию см. в дополнительном материале к Техническому резюме. {TFE.1 TR, рисунок 2; рисунок 2.29}

Больше информации можно найти в оригинальном источнике (IPCC, 2013). Публикуется с любезного разрешения Межправительственной группы экспертов по изменению климата.

Рисунок 3



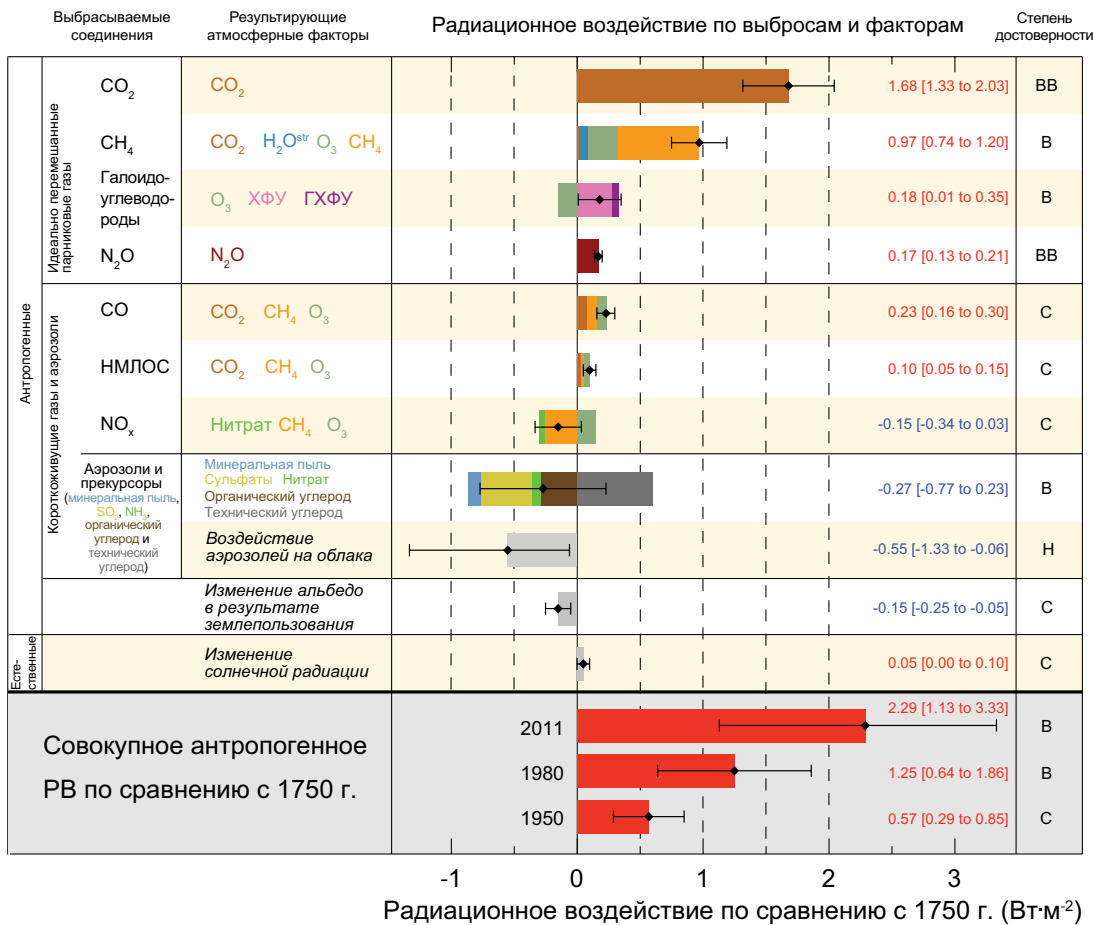
Источник: IPCC (2013).

Следующее оригинальное полное описание рис. 3 опубликовано в IPCC (2013):

Рисунок РП.10. Повышение средней глобальной приземной температуры как функция совокупных глобальных выбросов CO<sub>2</sub>, полученных по различным данным. Результаты, полученные по многим моделям класса «климат-углеродный цикл» для каждого сценария РТК до 2100 г., показаны цветными линиями и средними десятилетними значениями (точки). Некоторые десятилетние средние помечены для ясности (например, 2050 означает десятилетие 2040–2049 гг.). Результаты, полученные на модели за исторический период (1860–2010 гг.), показаны черным цветом. Цветной шлейф иллюстрирует межмодельный разброс по четырем сценариям РТК, а его меньшая яркость показывает уменьшение количества моделей в сценарии РТК 8.5. Среднее значение и диапазон, рассчитанные по моделям ПССМ5, с учетом роста CO<sub>2</sub> на 1 % в год (расчетный рост CO<sub>2</sub> на 1 % в год), показаны тонкой черной линией и серым цветом. Для конкретного объема совокупных выбросов CO<sub>2</sub> расчет роста CO<sub>2</sub> на 1 % в год дает меньшее потепление, чем в случае с РТК, которые включают дополнительные воздействия иных, нежели CO<sub>2</sub>, газов. Значения температуры приводятся относительно базового периода 1861–1880 гг., а выбросы – относительно 1870 г. Средние значения по десятилетиям соединяются прямыми линиями. Дополнительную техническую информацию см. в дополнительном материале к Техническому резюме. {Рисунок 12.45; TFE.8 TP, рисунок 1}

Больше информации можно найти в оригинальном источнике (IPCC, 2013). Публикуется с любезного разрешения Межправительственной группы экспертов по изменению климата.

Рисунок 4



Источник: IPCC (2013).

Следующее оригинальное полное описание рис. 4 опубликовано в IPCC (2013):

Рисунок РП.5. Оценки радиационного воздействия в 2011 г. по сравнению с 1750 г. и агрегированные неопределенности основных факторов изменения климата. Значения показывают глобальное среднее радиационное воздействие (РВ<sup>14</sup>) в разбивке по выбрасываемым соединениям или процессам, что дает комбинацию факторов. Наилучшие оценки чистого радиационного воздействия показаны черными ромбами с соответствующими интервалами неопределенности; численные значения приводятся в правой части рисунка, наряду со степенью достоверности чистого воздействия (BB – весьма высокая, B – высокая, C – средняя, H – низкая, VH – весьма низкая). Воздействие, обусловленное снижением альbedo из-за технического углерода на снегу и льду, включен в «полоску» аэрозолей и технического углерода. Незначительные воздействия от конденсационного следа (0,05 Вт.м<sup>2</sup>, включая порожденные им перистые облака), а также ГФУ, ПФУ и SF<sub>6</sub> (в общей сложности 0,03 Вт.м<sup>2</sup>) не показаны. РВ по газам с учетом их концентраций могут быть получены путем суммирования параметров «полосок» одного цвета. Вулканическое воздействие не учитывается, поскольку его эпизодический характер затрудняет сравнение с другими механизмами воздействия. Значения совокупного антропогенного радиационного воздействия предоставляются за три разных года в сопоставлении с 1750 г. Более подробная техническая информация, включая диапазоны неопределенности по отдельным компонентам и процессам, приведена в дополнительном материале к Техническому резюме. {8.5; рисунки 8.14-8.18; рисунки ТР.6 и ТР.7}

Больше информации можно найти в оригинальном источнике (IPCC, 2013). Публикуется с любезного разрешения Межправительственной группы экспертов по изменению климата.

## Вредные организмы, наносящие ущерб сельскохозяйственным культурам, лесному хозяйству и экосистемам в глобальном масштабе

С момента одомашнивания около 10 тыс. лет назад сельскохозяйственным культурам угрожает множество вредных организмов, вызывающих потери урожая, что часто становится причиной голода и социальной напряженности. В среднем, в общемировом масштабе из-за вредных организмов в процессе выращивания пропадает от 10 до 28 процентов культур (Savary *et al.*, 2019). После сбора урожая наблюдаются дальнейшие потери, причем в развивающихся странах ситуация развивается наихудшим образом. Более того, помимо потерь урожая присутствие микотоксинов (токсинов, продуцируемых грибами) в пищевых продуктах и кормах может представлять серьезную угрозу здоровью человека и животных (Magan, Medina and Aldred, 2011; Van Der Fels-Klerx, Liu and Battilani, 2016).

Исторические и современные примеры четко демонстрируют огромный ущерб, который может быть нанесен при возникновении очагов вредных организмов.

Два классических примера с насекомыми-вредителями демонстрируют экономический и социальный ущерб, вызванный экспансией инвазивных видов. Один из них – инвазия филлоксеры виноградной (*Daktulosphaira vitifoliae*) в европейские виноградники и их уничтожение во второй половине девятнадцатого века, а второй пример – это колорадский жук (*Leptinotarsa decemlineata*) в двадцатом веке, который стремительно заселил картофельные поля. Оба этих вредителя родом из Соединенных Штатов Америки. Совсем недавно несколько видов насекомых из Северной Америки, серьезного нашествия которых ранее не отмечалось, из-за изменения популяционной динамики проявили себя вредителями, уничтожающими лесные ресурсы. К ним относятся: осиновая змеевидная моль (*Phyllocnistis populiella*), пятнистая моль ивовых листьев (*Micrurapteryx salicifoliella*) и пяденица (*Nepytia janetae*). Они уничтожили миллионы гектаров осиновых, ивовых и пихтово-еловых лесов с начала 1990-х годов (Bebber, Ramotowski and Gurr, 2013). К другим местным видам, которые стали вредными организмами, относятся: лубоед южный сосновый и горный сосновый лубоед (*Dendroctonus frontalis* и *Dendroctonus ponderosae*, соответственно), а также лубоед краснокрылый (*Dendroctonus rufipennis*), которые недавно широко распространились, заражая хозяйственно ценные сосны и ели (Anderegg, Kane and Anderegg, 2013; Bebber, Ramotowski and Gurr, 2013).

К классическим примерам вреда, нанесенного болезнями сельскохозяйственных и лесных культур, относятся массовый голод в Ирландии в 1840-х годах, вызванный гибелью урожая картофеля из-за *Phytophthora infestans*, эпидемия кофейной ржавчины на Цейлоне в 1860-х годах, вызванная *Hemileia vastatrix*, и великий голод в Бенгалии в 1943 году, вызванный *Helminthosporium oryzae* (Schumann, 1991). Еще один важный пример, который не следует забывать, – уничтожение каштана американского (*Castanea dentata*) фитопатогенным грибом *Cryphonectria parasitica*: к 1950-м годам погибло 80 процентов каштанов (Schumann, 1991), что серьезно отразилось на ландшафте всей страны. Угроза никуда не исчезла. В настоящее время распространяются новые и более опасные штаммы ржавчинных грибов *Puccinia graminis* (Saunders, Pretorius and Novmøller, 2019) и *Puccinia striiformis* (Liu *et al.*, 2017), а новая инвазивная линия *Phytophthora infestans* стремительно вытеснила другие генотипы фитофтороза (Cooke *et al.*, 2012). Внезапное увядание оливковых деревьев, вызванное *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, которое уничтожило миллионы оливковых деревьев в Апулии (Италия) и которое также угрожает другим европейским и средиземноморским странам, является примером того, как патоген может воздействовать на сельскохозяйственную культуру и на ландшафт региона (Sicard *et al.*, 2018; Schneider *et al.*, 2020). В Калифорнии и Орегоне в Соединенных Штатах Америки, а также в других районах, гриб *Phytophthora ramorum*, вызывающий внезапную гибель дуба, представляет угрозу для лесных экосистем (Rizzo, Garbelotto and Hansen, 2005), в то время как другие виды *Phytophthora*, такие как *P. kernoviae* и

*P. agathidicida*, в Новой Зеландии наносят вред легендарным и культурно значимым деревьям каури (Scott and Williams, 2014), а *P. pinifolia* наносит ущерб лесам в Чили (Duran *et al.*, 2008).

Помимо насекомых и патогенов серьезный ущерб также могут наносить нематоды. По данным Williamson and Gleason (2003), нематоды относятся к одним из наиболее часто встречающихся организмов на планете, они оказывают воздействие на все экосистемы. Большинство из них – свободноживущие и безвредные для растений, например, нематоды, питающиеся такими микроорганизмами, как бактерии, однако небольшое количество видов нематод является облигатными паразитами растений, и некоторые из этих паразитирующих на растениях нематод могут представлять серьезную угрозу для управляемых и неуправляемых экосистем. В сельском хозяйстве к группе нематод, наносящих наибольший экономический ущерб, относятся малоподвижные эндопаразиты, в том числе роды *Heterodera* и *Globodera* (оба рода – цистообразующие нематоды), а также род *Meloidogyne* (галловые нематоды). В лесном хозяйстве болезнь увядания хвойных пород, вызываемая *Bursaphelenchus xylophilus* (сосновой стволовой нематодой), – одна из самых губительных инвазивных болезней, поражающих сосны (*Pinus* spp.) и оказывающих значительное воздействие на естественные экосистемы в Африке, Северной Америке, Азии и Европе (CABI, 2021a). Особенно серьезный ущерб эта нематода наносит в Восточной Азии, включая Китай, Японию и Республику Корея (Ikegami and Jenkins, 2018).

И наконец, некоторые виды растений сами являются вредными организмами. Сорные растения – это «нежелательные растения» в сельском хозяйстве, садоводстве, лесном хозяйстве и неуправляемых экосистемах (Juroszek and von Tiedemann, 2013a; Korres *et al.*, 2016; Wan and Wang, 2019). Следовательно, сорное растение или сорняк – это растение, растущее не в том месте и/или не в то время. Сорняки обладают рядом свойств, которые могут приносить пользу. Некоторые виды сорных растений могут быть полезными для экосистемы, например, обеспечивая пищей таких опылителей, как пчелы, создавая среду обитания для многих полезных организмов, а также покрывая почву, тем самым, уменьшая ее эрозию. Также они могут быть первыми растениями, которые заселяют поврежденные почвы или экосистемы (например, после пожаров, оползней), они укрепляют берега рек и песчаных дюн. Кроме того, они могут быть традиционными лекарственными растениями. С другой стороны, сорняки могут вызывать контактный дерматит или своей пылью провоцировать аллергические реакции, и они могут быть токсичными для сельскохозяйственных животных (Ziska, Epstein and Schlesinger, 2009). Они также могут оказывать отрицательное воздействие там, где их присутствие нежелательно. Многие сорные растения обладают устойчивостью к различным воздействиям окружающей среды, а также высоким уровнем фенотипической пластичности и эволюционным потенциалом (Clements and DiTommaso, 2011), что обеспечивает их крайне высокой конкурентоспособностью по сравнению с культурными растениями, селекция которых проводилась с целью достижения однородности. По этой причине сорняки могут приводить к большим как количественным, так и качественным, потерям сельскохозяйственных культур и других растений и мест обитания, поскольку они конкурируют за подземные (например, вода и питательные вещества) и надземные (например, свет) ресурсы (Karnakakis *et al.*, 2018; Naidu, 2015; Peters, Breitsameter and Gerowitt, 2014; Ramesh *et al.*, 2017). Например, невозможно без борьбы с сорняками выращивать морковь (*Daucus carota*) даже на приусадебном участке, поскольку у семян моркови плохая конкурентоспособность.

## Пути распространения, используемые вредными организмами

Распространение вредных организмов происходит в ходе как естественных, так и антропогенных процессов, с существенным вкладом в течение последних десятилетий со стороны глобализации рынков растений и растительных продуктов, включая пищевые продукты, посадочный материал и древесину. Международный туризм и торговля сельскохозяйственной продукцией способствовали перемещению сельскохозяйственных культур, сорных растений, патогенов и

насекомых-вредителей из их родной среды в новые места. Культуры, недавно внедренные в сельскохозяйственное производство, могут расширить распространённость вредных организмов, а интродукция новых вредных организмов в абсолютно новую экосистему может стать причиной чрезвычайно серьёзного ущерба, поскольку вредные организмы и растения-хозяева, возможно, не эволюционировали вместе. Такая коэволюция была особенно отмечена в отношении растений и вредных для них организмов (Woolhouse *et al.*, 2002), она создала стабильное равновесие между растениями-хозяевами и вредными организмами в рамках эндемичных экосистем. В качестве примера можно привести сосновую стволовую нематоду (см. конкретный пример ниже), которая эволюционировала вместе с видами растений-хозяев и на своей родине, в Северной Америке, не наносит серьёзного ущерба. Однако после интродукции в Азию она вызвала гибель миллионов деревьев различных видов *Pinus*.

По данным Anderson *et al.* (2004), половина новых болезней растений распространяется в процессе международного туризма и торговли, при этом естественное распространение, которому способствуют погодные явления, является вторым по значимости фактором. Кроме того, вероятно, существуют взаимосвязи между акклиматизацией вредных организмов и климатическими или погодными условиями. Например, глобальное потепление может способствовать акклиматизации некоторых вредных организмов, которые иначе не смогли бы акклиматизироваться (например, во время необычайно теплой зимы в условиях умеренного климата). И действительно, растущая глобализация рынков в последние годы, наряду с ростом температур, привела к ситуации, чрезвычайно благоприятной для перемещения и акклиматизации вредных организмов, с сопутствующим увеличением риска серьёзных потерь урожая (Deutsch *et al.*, 2018; Savary *et al.*, 2019). Поэтому при рассмотрении потенциального воздействия изменения климата на здоровье растений и, как следствие, на распространённость растений, важно понимать не только то, какие условия позволяют вредным организмам благополучно развиваться, но и пути распространения, по которым они перемещаются из одного места в другое.

Вместе с тем, необходимо понимать пути распространения при определении, какие меры следует принимать для смягчения последствий и адаптации к изменениям фитосанитарного риска, вызванным изменением климата. Предпринимаются значительные национальные и международные усилия по снижению риска международного перемещения вредных организмов (Meurisse *et al.*, 2019), включая публикацию и применение Международных стандартов по фитосанитарным мерам (МСФМ), которые разрабатываются под эгидой Комиссии по фитосанитарным мерам и Секретариата МККЗР. Они включают в себя руководство по проведению анализа фитосанитарного риска (АФР) с целью определения риска интродукции (проникновения и акклиматизации) и распространения вредных организмов, а также с целью выбора мер, которые необходимо принимать для того, чтобы этого не допустить (МСФМ 2, 2019; МСФМ 11, 2019; МСФМ 21, 2019). Такие фитосанитарные меры, как правило, применяются с учетом рисков, связанных с путями распространения. Поскольку существует требование периодически проводить пересмотр информации, на основе которой проводится АФР (МСФМ 11, 2019), очевидно, что оно предусматривает повторную оценку рисков, связанных с путями распространения, либо, как минимум, рисков, которые в значительной степени зависят от изменения климатических условий, в том числе, от возникновения экстремальных погодных явлений, в результате которых карантинные вредные организмы могут распространиться на большие расстояния.

### Древесная упаковка

Исторически сложилось, что древесина, включая упаковочные материалы, сыграла одну из основных ролей в распространении вредных для растений организмов. Одним из примеров, демонстрирующих значимость такого пути распространения, является перемещение в упаковочных материалах таких инвазивных видов насекомых, как азиатский усач *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) в процессе международной торговли (EPPO, 2020a and 2021a). К кормовой базе этого полифага (т.е. он питается разнообразной пищей) относятся несколько видов клена (*Acer*), тополя (*Populus*), ивы (*Salix*) и вяза (*Ulmus*) в лесных и городских насаждениях. Будучи родом из Китая и Кореи, этот вредитель был интродуцирован в Соединенные Штаты Америки и Канаду с зараженными древесными упаковочными материалами и также был обнаружен в нескольких

странах Европы. В этих странах реализуются программы по борьбе: осуществляется выявление, удаление и уничтожение зараженных деревьев. Тщательный досмотр и обработка твердых древесных упаковочных материалов, таких как поддоны и крепежная древесина, – это международное требование в целях предотвращения новых интродукций. Моделирование с целью прогноза географической распространенности этого жука показало, что изменение климата может изменить распространенность и воздействие этого вредителя (Hu *et al.*, 2009).

Древесные упаковочные материалы также указываются в качестве вероятного пути распространения многих видов жуков-короедов, таких как *Ips grandicollis* (Coleoptera: Curculionidae), а также других опасных вредителей леса, таких как ясеневая изумрудная златка *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) и рогохвост *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae) (Meurisse *et al.*, 2019). Также отмечается перемещение сосновой стволовой нематоды *B. xylophilus* (см. анализ конкретного примера) или ее насекомого-переносчика в необработанном древесном упаковочном материале (Sousa *et al.*, 2011).

## Семена, посадочный материал, почва и среды выращивания

Глобализация рынков семенного и посадочного материала является одной из основных причин имеющего место в последнее время стремительного распространения возбудителей болезней растений на новые растения-хозяева. Более того, некоторые недавно интродуцированные патогены и насекомые-вредители, типичные для теплых регионов, с легкостью распространяются в умеренных зонах из-за роста температуры. Как правило, семена – переносчики вредных организмов. Взрослые растения также являются отличными переносчиками живых насекомых, в том числе клещей, тлей, гусениц, минирующих насекомых и трипсов. По этой причине в Австралии, к примеру, провели анализ фитосанитарного риска, представляемого срезанными цветами, в котором приводятся связанные с ними основные виды насекомых.

Особенно в секторе овощеводства распространение в последнее время новых патогенов в разных странах четко связано с тем фактом, что глобализация рынков благоприятствует их распространению с семенами; влияние глобального потепления на растения и на их хозяев также способствует такому распространению. Например, это имеет место в случае с *Alternaria* spp., *Fusarium equiseti* и *Myrothecium* spp., которые недавно были выявлены на салате, дикорастущей и культивируемой руколе, корн-салате, базилике и шпинате (Gilardi, Garibaldi and Gullino, 2018). Вирусы томата (вирус коричневой морщинистости плодов томата) и вириды (вириод веретеновидности клубней картофеля) представляют собой классические, недавние и актуальные примеры. Вирус коричневой морщинистости плодов томата появился в течение последних нескольких лет, свободно распространяясь с семенами. Многие патогены, наносящие серьезный ущерб листовым овощам, таким как упомянутые выше, могут переноситься с семенами и, тем самым, оставаться незамеченными. Таким образом, даже низкие уровни зараженности семян могут привести к стремительному распространению новых болезней в отдаленных географических зонах (Gitaitis and Walcott, 2007; Gullino, Gilardi and Garibaldi, 2014a; Munkvold, 2009). К сожалению, как показывают многочисленные примеры недавних интродукций, это случается очень часто, несмотря на наличие отраслевых и международных стандартов, установленных с целью снижения такого риска.

На отрасль декоративных растений, ввиду ее международного характера, сильное влияние оказывает интродукция вредных организмов с зараженным материалом (Daughtrey and Buitenhuis, 2020). В декоративных растениях вне зависимости от того, выращиваются ли они из семян, саженцев или черенков, могут запросто прятаться вредные организмы. Только у растений, выращенных путем микроразмножения из культуры ткани (как правило, это декоративно-лиственные растения), значительно снижен риск заражения патогенами, при условии, что обеспечивается их чистота, и как следствие, не допускается заражение (Chen and Henny, 2006). Некоторые из наиболее опасных вредителей тепличных культур – насекомые и клещи – появились из-за импорта зараженного посадочного материала, они быстро акклиматизировались благодаря особым условиям окружающей среды в теплицах (Albajes *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2015). Декоративные кофейные деревья, импортированные из Коста-Рики и зараженные *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, считаются вероятным переносчиком этого вредоносного патогена в Европе (Bergsma-Viami *et al.*, 2015).

В почве и субстратах, которые часто импортируются, могут находиться передающиеся через почву возбудители болезней (например, *Fusarium* spp., нематоды), личинки насекомых-вредителей и семена сорных растений. Задокументировано много случаев заражения торфа и других сред выращивания в отрасли производства декоративных растений и в питомниках. Засорение субстратов передающимися через почву патогенами (например, *Fusarium oxysporum*, *Pythium* spp., *Rhizoctonia solani*) становится причиной неполного обеззараживания и заражения молодых растений на раннем этапе (Garibaldi and Gullino, 1995).

Наряду с фитосанитарным риском, который представляет описанное выше перемещение семян, посадочного материала, почвы и сред выращивания, в последние годы появился новый тип угрозы благодаря увеличению интернет-рынка, посредством которого посадочный материал распространяется по всему миру. Посадочный материал, который продается таким образом, зачастую имеет плохое качество и, в целом, не проходит фитосанитарный контроль, тем самым представляя новый тип угрозы. Этот аспект, еще не принимаемый во внимание в настоящий момент, необходимо учесть в будущем.

### Транспортные средства, грузы и перемещение животных

Тракторы, легковые машины, грузовики, железнодорожный транспорт, корабли, самолеты, контейнеры, бывшая в употреблении сельскохозяйственная техника, повторно выставленная на продажу, и другие транспортные средства представляют собой распространенный способ пассивного перемещения вредных организмов. И в самом деле, фитопатологи, энтомологи и специалисты по сорным растениям часто рассматривают скорость распространения вредных организмов как непосредственно связанную со скоростью транспортных средств.

Живые организмы также могут распространять вредные организмы, например, семена сорных растений на шкуре или мехе животных. Так, стада животных, переносимые на новые территории в поисках пастбищ, способствуют распространению семян инвазивного чужеродного растения *Parthenium hysterophorus* на востоке и на юге Африки (McConnachie *et al.*, 2011).

Глобальная сеть морских перевозок многими специалистами признается путем распространения инвазивных видов. Один из видов насекомых, распространившийся по всему миру при перевозке грузов, включая перевозку судами и грузовыми контейнерами, — непарный шелкопряд *Lymantria dispar*. Этот вид может быть интродуцирован в новую зону, когда климат в порту подходит для его выживания и акклиматизации. На сегодняшний день известно два подвида с разным географическим происхождением, и для оценки угрозы глобального распространения азиатского подвида этого вредителя использовалась модель в программе CLIMEX (Paini *et al.*, 2018).

Коричнево-мраморный клоп *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) — еще один пример инвазивного насекомого, который, в основном, перемещается в процессе международной торговли как вредный организм, засоряющий нерегулируемые товары, такие как техника, контейнеры и транспортные средства, которого также перевозят пассажиры и который в меньшей степени переносится с посадочным материалом. Он чрезвычайно многояден и использует в качестве своей кормовой базы более 300 видов растений-хозяев, в том числе продовольственные культуры, лесные деревья и декоративные растения. С момента своей интродукции, вероятнее всего, из Северной Америки, этот вредитель стал причиной значительных экономических потерь в сфере производства фундука в Грузии и плодовых культур в Италии. В работе Burne (2019) можно найти подробное описание оценки фитосанитарного риска в отношении интродукции и акклиматизации *H. halys*.

### Пассажиры

Люди, совершая туристические поездки или выезжая в командировки, являются отличными переносчиками вредных организмов, особенно при отсутствии жестких мер контроля в пунктах пропуска. Поездки на отдых, в частности, нередко сопровождаются ввозом пищевых продуктов, семян или экзотических растений, а они могут быть заражены вредными организмами или сами могут таковыми являться. Для борьбы с этим все больше стран проводят в пунктах



въезда (аэропорты и порты) кампании, направленные на повышение уровня общественного понимания угрозы, которую перемещение растений и частей растений представляет для биозащиты. Многие страны проверяют багаж и почтовые отправления на наличие в них пищевых продуктов и других материалов, представляющих риск в области биозащиты, и призывают прибывающих пассажиров заявлять о потенциальных рисках в области биологической защиты. Пассажиры и их багаж проходят через сканер-рентген в аэропорту, используются собаки-ищейки и ручной досмотр. Пассажиры, ввозящие представляющий риск материал, могут быть оштрафованы, либо им даже может быть запрещен въезд. В этом отношении такие страны, как Австралия, Новая Зеландия и Соединенные Штаты Америки (McCullough *et al.*, 2006) уже давно применяют жесткие меры контроля, а также собирают и предоставляют данные по выявляемым.

## Естественное распространение

Существуют примеры естественного (т.е. без помощи человека) значительного расширения ареалов местных и неместных видов вредных организмов. Как правило, они связаны с существенными изменениями распространения растений-хозяев или с изменением климата. В части изменения климата повышение температуры в значительной мере способствовало расширению ареалов вредных организмов, особенно в более высоких широтах и на большей высоте над уровнем моря. Например, в Европе повышение температуры зимой способствовало увеличению выживаемости личинок и распространению взрослых особей южного походного шелкопряда *Thaumetopoea pityocampa*, ведущих ночной образ жизни, что позволило этому вредителю заселить более северные территории (Battisti *et al.*, 2006). Кроме того, споры патогенов могут переноситься ветром и штормами на большие расстояния, даже по разным континентам. Например, прогнозируется, что изменение розы ветров или направления и скорости штормов в будущем будет способствовать распространению стеблевой ржавчины пшеницы, вызываемой *Puccinia graminis* (Prank *et al.*, 2019). Кроме того, ржавчина мирта (*Austropuccinia psidii*), впервые выявленная в Австралии в 2010 году на центральном побережье Нового Южного Уэльса, расширяет свою распространенность, и в настоящее время эту болезнь можно обнаружить в ряде экосистем естественных лесов, причем ее воздействие варьируется от мелких пятен на листьях до сильнейшего поражения побегов и стеблей и отмирания деревьев (Pegg *et al.*, 2017). Распространению некоторых вредных организмов, в том числе плодовых мух, могут способствовать ураганы в Карибском бассейне, Центральной Америке и на юге Соединенных Штатов Америки. Например, в работе Flitters (1963) отмечается, что после урагана «Карла» в Техасе наблюдалось необычайно большое количество насекомых нескольких видов, на основании чего можно сделать предположение, что их принесло ураганом издалека.

## Подходы к изучению влияния изменения климата на вредные для растений организмы

В течение последних 30–40 лет проводилась оценка влияния нескольких факторов – повышения температуры, CO<sub>2</sub>, озона или ультрафиолетового излучения спектра В, а также изменения водного режима или режима влажности – на частоту возникновения новых случаев болезней растений и степень их тяжести. Исследования были посвящены вредным организмам, поражающим такие полевые культуры, как пшеница, ячмень, рис, соя и картофель (Bregaglio, Donatelli and Confalonieri, 2013; Evans *et al.*, 2008; Launay *et al.*, 2014; Luck *et al.*, 2011; Mikkelsen, Jørgensen and Lyngkjær, 2014), плодовые культуры (Gullino *et al.*, 2018; Koo, Hong and Yun, 2016), включая тропические и плантационные культуры (Ghini, Hamada and Bettiol, 2011), а также лесные деревья (Battisti, 2008; Jactel, Koricheva and Castagneyrol, 2019; Sturrock *et al.*, 2011).

В таких исследованиях применялся целый ряд подходов, как показано в таблице 1. В некоторых исследованиях проводились эксперименты для изучения последствий изменения одного или двух метеопараметров. В других изучалось распространение видов в зависимости от широты или градиента высоты в качестве косвенной характеристики изменения климата с течением времени. В дополнение

к этим эмпирическим подходам также применялись «теоретические» подходы, в частности, мета-анализ опубликованных результатов или анализ совокупности данных многолетних наблюдений. И, наконец, некоторые исследования опирались на экспертные заключения либо использовали имитационные модели с целью прогноза того, как ожидаемые изменения климата или состава атмосферы повлияют на распространенность, численность, степень воздействия и борьбу с вредными и другими организмами.

Экспериментальные подходы могут помочь получить полезную информацию о влиянии изменения климата на болезни и вредителей растений, однако лишь в небольшом числе таких исследований был реалистично смоделирован меняющийся климат (Chakraborty and Newton, 2011; Ingram, Gregory and Izac, 2008; Loustau *et al.*, 2007; Luck *et al.*, 2011; Pautasso *et al.*, 2012). Посвященные изменению климата исследования, которые проводились в системах обогащения атмосферного воздуха углекислым газом (FACE) и в камерах с открытым верхом, позволили лучше понять влияние разных параметров на развитие болезней различных культур (Eastburn, McElrone and Bilgin, 2011) (рис. 5). Такие системы также использовались для изучения сорных растений (Williams *et al.*, 2007) и насекомых (Delucia *et al.*, 2012). В целом, было выявлено усугубление большей части связанных с насекомыми и болезнями проблем, которые изучались в системах FACE в условиях увеличения концентрации CO<sub>2</sub>, как сообщается в недавней работе Ainsworth and Long (2021).

Фитотроны – климатические камеры, созданные с целью изучения влияния сочетаний параметров окружающей среды (Gullino *et al.*, 2011; Nakata *et al.*, 2017), они позволяют проводить исследования влияния краткосрочного увеличения концентрации CO<sub>2</sub> и температуры на взаимоотношения между хозяином и патогеном (Gullino *et al.*, 2018) для того, чтобы понять, каким образом в будущем могут возникнуть конкретные болезни (рис. 6). Результаты таких исследований можно использовать для разработки практических решений по реагированию на будущие сценарии, например, посредством оказания поддержки отрасли селекции растений. Они также могут позволить изучать другие, более косвенные проявления воздействия изменения климата на растения, например, влияние на продуцирование микотоксинов или на методы борьбы с болезнями (Gilardi *et al.*, 2017; Gullino *et al.*, 2020).

Полевые методы в естественной среде включают исследование по градиенту высоты над уровнем моря: от низких до высоких точек (Betz, Srisuka and Puthz, 2020; Garibaldi, Kitzberger and Chaneton, 2011), с сопутствующими изменениями температуры и влажности воздуха, а также исследования различных мест обитания в широтном направлении, в том числе, например, в условиях субтропического, умеренного и полузасушливого климата (Bairstow *et al.*, 2010; Scalone *et al.*, 2016). Преимущество первого подхода заключается в одинаковом световом дне независимо от высоты над уровнем моря. Во втором подходе световой день может различаться по широте. Например, по сравнению с условиями умеренного климата в тропиках летом дни короче, а ночи длиннее, а зимой – наоборот. При интерпретации результатов необходимо учитывать эти различия светового дня. Тем не менее, такой подход полезен для определения широкого спектра градиентов окружающей среды и ряда климатических зон в условиях реального мира, и такие исследования могут помочь установить, обитает ли определенный вид только в конкретном климате, либо он широко распространен и может заселять места обитания, в которых становится теплее (Juroszek and von Tiedemann, 2013a).

Для выявления закономерностей в реакциях конкретных вредных организмов на различные климатические переменные проводились мета-анализы совокупности опубликованных данных (Koricheva and Larsson, 1998; Massad and Dyer, 2010; Vilà *et al.*, 2021). Кроме того, для изучения последствий изменения климата, которые уже очевидны ввиду потепления в течение последних десятилетий, использовались совокупности данных многолетних наблюдений (Altermatt, 2010; Huang and Hao, 2020; Jeger and Pautasso, 2008). Такие совокупности данных многолетних наблюдений могут послужить подходящей основой для будущих исследований (Huang and Hao, 2020; Robinet and Roques, 2010), поскольку они могут помочь ученым различать влияние, вызванное изменением климата, и влияние, связанное с другими факторами (Garrett *et al.*, 2016 and 2021). Были предприняты попытки совершенствовать прогноз влияния потепления климата на насекомых путем сочетания данных из совокупности данных долгосрочных исследований,

крупномасштабных экспериментов и компьютерного моделирования (Diamond, 2018; Grünig *et al.*, 2020; Lehmann *et al.*, 2020) (рис. 12 и 13). Например, мета-анализ данных лабораторных исследований позволил сделать вывод, что виды, относящиеся к более высоким трофическим уровням (например, хищники), являются более восприимчивыми к изменению климата, чем организмы более низшего порядка (растения или насекомые-фитофаги) (Fussmann *et al.*, 2014). Это важно при изучении меняющегося влияния естественных врагов на динамику насекомых-вредителей и биологическую борьбу в условиях изменения климата – тема, по которой крайне мало полевых данных (Thomson, MacFadyen and Hoffman, 2010).

Можно использовать имитационные модели для прогноза будущего влияния изменения климата на вредные организмы (Sutherst, 1991; Sutherst *et al.*, 2011), а также для помощи в определении тактики и стратегии борьбы с вредными организмами (Ghini, Hamada and Bettiol, 2008; Hill and Thomson, 2015; Salinari *et al.*, 2007; Shaw and Osborne, 2011). Один из методов моделирования, например, использует «поиск климатических соответствий», посредством которого изучается географическая зона с современным климатом, аналогичным будущему климату в зоне, представляющей интерес (в этом случае в части динамики численности вредных организмов), а затем результаты экстраполируются на будущие условия в зоне, представляющей интерес (Sutherst, Maywald and Russell, 2000). С целью разработки и проверки моделей «вредный организм – сельскохозяйственная культура – климат» другие методы моделирования могут быть основаны на совокупности данных многолетних наблюдений за метеорологическими параметрами, за развитием сельскохозяйственных культур, а также за распространенностью и численностью вредных организмов (Angelotti *et al.*, 2017; Madgwick *et al.*, 2011). В других примерах недавних исследований с использованием моделирования, приведенных в таблице 2, учитываются такие параметры, как количество поколений в год, если речь идет о насекомых-вредителях, сроки цветения растений и степень воздействия соответствующей болезни, а также распространенность сорных растений в общемировом масштабе.

**Таблица 1** Примеры экспериментальных и теоретических подходов в биологических исследованиях, посвященных изменению климата

ТИП НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОДХОДА	ОПИСАНИЕ И КОММЕНТАРИИ	ИЗБРАННАЯ БИБЛИОГРАФИЯ
Эксперименты в контролируемых условиях	Контролируемые условия не являются реалистичными, однако они облегчают изучение одного или нескольких параметров окружающей среды благодаря более низкому уровню variability и меньшему числу взаимодействий.	Gullino <i>et al.</i> , 2018.
Эксперименты на местах, в фермерских хозяйствах и в естественных условиях	Полевые условия – реалистичны, однако параметры окружающей среды сложно контролировать ввиду их variability и сложных взаимодействий.	Raderschall <i>et al.</i> , 2021; Torresen <i>et al.</i> , 2020.
Исследования по градиенту высоты над уровнем моря: от низких до высоких точек	Влияние изменения температуры и уровня осадков можно изучать на малом расстоянии с одинаковой продолжительностью дня (например, можно сравнивать характеристики одного вида).	Betz, Srisuka and Puthz, 2020.
Исследования в широтном направлении	Можно проводить исследования по климатическому градиенту – от умеренного до тропического, с изменениями температуры и уровня осадков на большом расстоянии, однако продолжительность дня может быть разной в разных местах (например, можно сравнивать характеристики одного вида или биоразнообразие видов в целом в разных климатических условиях).	Scalone <i>et al.</i> , 2016.
Мета-анализ опубликованных данных	Заключается в поиске общих закономерностей в реакциях конкретных таксонов на variability климатических факторов. Необходимо наличие достаточного количества опубликованных результатов для получения полноценных выводов.	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
Мониторинг данных, совокупность данных многолетних наблюдений по различным параметрам	Заключается в многолетних полевых наблюдениях с целью изучения уже ощутимых последствий потепления климата за последние десятилетия. Необходимо использовать многолетние метеорологические данные и другие данные многолетних наблюдений, при их наличии, для поиска иных возможных причин наблюдаемых изменений (особенно в управляемых системах).	Huang and Hao, 2020; Palmer <i>et al.</i> , 2017.
Экспертное заключение	Можно использовать многолетний опыт и знания экспертов. Можно теоретически рассматривать полный жизненный цикл конкретного вида вредных организмов, однако такой подход в некоторой степени носит субъективный характер.	Karkanis <i>et al.</i> , 2018.
Поиск климатических соответствий	В современных климатических условиях выявляется аналог будущего климата целевой зоны, и в этом районе изучается динамика вредных организмов с целью получения представления о сравнительной динамике (например, динамическая климатическая модель CLIMEX). Можно также использовать другие инструменты, например, MaxEnt, позволяющий сравнить пригодность среды обитания для целевых видов в различных местах.	Biber-Freudenberger <i>et al.</i> , 2016; Sutherst, May-wald and Rus-sell, 2000.
Метод моделирования, использующий для имитации будущего фитосанитарного риска один или несколько сценариев или моделей изменения климата, либо широкие комплексы сценариев или моделей изменения климата	Используемые сценарии или модели можно классифицировать в категориях от «консервативных» до «наихудших», и это также возможно в рамках одной модели изменения климата, если применяются различные сценарии репрезентативных траекторий концентраций (РТК 2.6, РТК 4.5, РТК 6.0, РТК 8.5). Однако использование одного конкретного сценария изменения климата только в одной климатической модели уже не считается достаточным, поскольку в него не включена возможная variability. Поэтому часто используются широкие комплексы сценариев или моделей изменения климата.	Angelotti <i>et al.</i> , 2017; Launay <i>et al.</i> , 2020.

CLIMEX, климатическое моделирование экстремальных явлений; РТК, репрезентативная траектория концентраций.

Примечание: Ссылки на публикации были выбраны на субъективной основе, предпочтение отдавалось исследованиям, проведенным после 2000 года.

Источник: Переработано по материалам Juroszek and von Tiedemann, 2013a.

Рисунки 5а



Камеры с открытым верхом для изучения воздействия увеличения концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе в Петролине, Бразилия

Рисунки 5б



Рисунок 6



Фитотроны, используемые для вегетативного роста в контролируемых условиях. Благодаря имитационному моделированию многочисленных факторов окружающей среды фитотроны позволяют изучать воздействие изменения климата на растения и поражающие их патогены.

**Таблица 2** Примеры исследований с имитационным моделированием фитосанитарного риска, в которых моделирование с вредными организмами было связано со сценариями изменения климата

СТРАНА ИЛИ РЕГИОН	ПЕРИОД(Ы) ВРЕМЕНИ	КУЛЬТУРЫ, КОТОРЫЕ ПОСТРАДАЮТ, ВИДЫ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ	ИЗБРАННАЯ БИБЛИОГРАФИЯ
<b>НАСЕКОМЫЕ</b>			
Швейцария	2070–2099 гг.	Различные культуры: Коричнево-мраморный клоп ( <i>Halyomorpha halys</i> ) с широким спектром потенциальных растений-хозяев, по прогнозам, распространится в более высокогорные районы, в год будет появляться больше поколений, и период его активности весной будет начинаться раньше.	Stoekli, Felber and Haye, 2020.
Во всем мире	2050 г., 2100 г.	Различные культуры: Прогнозируется увеличение зоны, подходящей для кукурузной лиственной совки ( <i>Spodoptera frugiperda</i> ).	Zacarias, 2020.
Во всем мире	2050 г.	<b>Томат:</b> Прогнозируется, что несколько стран столкнутся с потенциальным увеличением количества очагов обыкновенного паутинного клеща ( <i>Tetranychus urticae</i> ), при этом биологическая борьба при помощи его основного хищника <i>Phytoseiulus persimilis</i> не станет более эффективной.	Litkas <i>et al.</i> , 2019.
Соединенные Штаты Америки, Средний Запад	2001–2050 гг., 2051–2100 гг.	<b>Кукуруза и соя:</b> Прогнозируется воздействие девяти разных насекомых-вредителей в целом. Насекомые-вредители переместятся севернее, поскольку «оптимальные климатические условия» будут в более северных районах.	Taylor <i>et al.</i> , 2018.
Во всем мире	2041–2060 гг., 2061–2080 гг.	<b>Картофель:</b> Прогнозируется распространение колорадского жука ( <i>Leptinotarsa decemlineata</i> ) в северные регионы.	Wang <i>et al.</i> , 2017.
Африка	2041–2060 гг.	Различные культуры: Прогнозируется частичное увеличение пригодных сред обитания для <i>Bactrocera dorsalis</i> , <i>Ceratitis cosyra</i> и <i>Tuta absoluta</i> по всему континенту.	Biber-Freudenberger <i>et al.</i> , 2016.
Люксембург	2021–2050 гг., 2069–2098 гг.	<b>Масличный рапс:</b> <i>Meligethes aeneus</i> , по прогнозам, будет раньше поражать посеы.	Junk, Jonas and Eickermann, 2016.
Скандинавские страны и центральные части Европы	2011–2040 гг., 2071–2100 гг.	<b>Лесные деревья, хвойные деревья:</b> Прогнозируется увеличение частоты и длительности роения короода-типографа ( <i>Ips typographus</i> ) в конце лета. Возможно появление второго поколения на юге Скандинавии и третьего поколения в равнинной части Центральной Европы.	Jönsson <i>et al.</i> , 2011.
<b>ВОЗБУДИТЕЛИ БОЛЕЗНЕЙ</b>			
Франция	2020–2049 гг., 2070–2099 гг.	<b>Пшеница:</b> Прогнозируется увеличение риска возникновения бурой ржавчины пшеницы (возбудитель – <i>Puccinia triticina</i> ).	Launay <i>et al.</i> , 2020.
Франция	2020–2049 гг., 2070–2099 гг.	<b>Абрикос:</b> В зависимости от выращиваемого культивара (с ранним или поздним цветением) прогнозируется снижение или увеличение риска возникновения монилиального ожога (возбудитель – <i>Monilinia laxa</i> ).	Tresson <i>et al.</i> , 2020.
Канада, Квебек	2041–2070 гг.	<b>Соя:</b> Прогнозируется увеличение количества поколений соевой цистообразующей нематоды ( <i>Heterodera glycines</i> ).	St-Marseille <i>et al.</i> , 2019.
Во всем мире	2050 г., 2100 г.	<b>Соя:</b> Прогнозируется уменьшение зоны, благоприятной для азиатской ржавчины сои (возбудитель – <i>Phakopsora pachyrhizi</i> ).	Ramirez-Cabral, Kumar and Shabani, 2019.
Филиппины	2050 г.	<b>Банан:</b> Прогнозируется увеличение зоны, благоприятной для фузариозного увядания бананов (возбудитель – <i>Fusarium oxysporum</i> ).	Salvacion <i>et al.</i> , 2019.
Китай, центральная часть	2030-е, 2050-е, 2070-е, 2080-е годы	<b>Киви:</b> Прогнозируется увеличение зоны, благоприятной для бактериального рака (возбудитель – <i>Pseudomonas syringae</i> ).	Wang <i>et al.</i> , 2018.
Европа	2070 г.	<b>Сосны:</b> Прогнозируется увеличение риска возникновения болезни увядания хвойных пород (вызываемой сосновой стволовой нематодой <i>Bursaphelenchus xylophilus</i> ).	Ikegami and Jenkins, 2018.
Бразилия	2011–2040 гг., 2041–2070 гг., 2071–2100 гг.	<b>Виноград:</b> Прогнозируется уменьшение зоны, благоприятной для ложной мучнистой росы (возбудитель – <i>Plasmopara viticola</i> ), на территории всей Бразилии, при этом существуют различия между регионами или штатами.	Angelotti <i>et al.</i> , 2017.
Италия	2030 г., 2050 г., 2080 г.	<b>Виноград:</b> Возрастает вредоносность ложной мучнистой росы ( <i>Plasmopara viticola</i> ) ввиду большего количества весенних дней с благоприятными условиями, при этом болезнь будет возникать раньше и потребуются больше обработок.	Salinari <i>et al.</i> , 2006.
Индия	2010–2039 гг., 2040–2069 гг.	<b>Рис:</b> Прогнозируется увеличение заразности пирикулярноза риса (возбудитель – <i>Magnaporthe oryzae</i> ) в зимний период (с декабря по март), тогда как в сезон муссонов (с июля по октябрь), по прогнозам, она останется неизменной либо слегка уменьшится.	Viswanath <i>et al.</i> , 2017.
Германия, юго-западная часть	2050 г., 2100 г.	<b>Сахарная свекла:</b> Прогнозируется увеличение риска возникновения церкоспороза (возбудитель – <i>Cercospora beticola</i> ).	Kremer <i>et al.</i> , 2016.

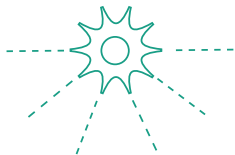
СОРНЫЕ РАСТЕНИЯ			
Во всем мире	2050 г.	В целом, в общемировом масштабе прогнозируется уменьшение зоны, пригодной для роста 32 инвазивных сорных растений. Однако в странах Европы, на севере Бразилии, в восточной части Соединенных Штатов Америки и на юго-востоке Австралии прогнозируется увеличение зоны, пригодной для большинства из этих 32 видов сорняков.	Shabani <i>et al.</i> , 2020.
Китай	2070–2099 гг.	Прогнозируется увеличение зоны, пригодной для роста шести из восьми чужеродных инвазивных видов сорных растений.	Wan and Wang, 2019.
Во всем мире	2041–2060 гг., 2061–2080 гг.	Прогнозируется расширение среды обитания, пригодной для паслена колючего ( <i>Solanum rostratum</i> ), в приполярные широты.	Wan and Wang, 2019.
Во всем мире	2050 г.	Прогнозируется увеличение зоны, пригодной для лантаны сводчатой ( <i>Lantana camara</i> ), однако на разных континентах будут наблюдаться значительные отличия.	Qin <i>et al.</i> , 2016.
Во всем мире	2100 г.	Прогнозируется увеличение зоны, пригодной для плевела жесткого ( <i>Lolium rigidum</i> ), в Северной Америке, Южной Америке, Европе и Азии, тогда как в Африке и Океании прогнозируется ее уменьшение.	Castellanos-Frias. <i>et al.</i> , 2016.
Соединенные Штаты Америки, Колорадо	2050 г.	Прогнозируется увеличение зоны, пригодной для <i>Bromus tectorum</i> .	West <i>et al.</i> , 2015.
Европа	2010–2030 гг., 2050–2070 гг.	Прогнозируется расширение зоны, пригодной для амброзии полыннолистной ( <i>Ambrosia artemisiifolia</i> ), в северные районы, также прогнозируется дальнейшее ограничение ее распространения в Южной Европе из-за стресса, вызываемого засухой.	Storkey <i>et al.</i> , 2014.
Аргентина, центральная часть	2020–2040 гг.	Прогнозируется увеличение продуктивности гумая ( <i>Sorghum halepense</i> ).	Leguizamon and Acciaresi, 2014.

*Примечание:* Ссылки на публикации были выбраны на субъективной основе, предпочтение отдавалось недавним публикациям. Больше сводных таблиц с результатами имитационного моделирования можно найти в литературных источниках: по патогенам или болезням (например, Juroszek and von Tiedemann, 2015; Miedaner and Juroszek, 2021a), по насекомым-вредителям (например, Choudhary, Kumari and Fand, 2019), по сорным растениям (например, Clements, DiTommaso and Hyvönen, 2014).

# Влияние изменения климата на вредные для растений организмы







**В** этом разделе настоящего доклада рассматриваются потенциальные последствия воздействия изменения климата на вредные организмы и, как следствие, на здоровье растений, во-первых, с точки зрения общих тенденций, а затем в форме анализа влияния на отдельные виды или группы видов на конкретных примерах.

## **Имитационное моделирование будущего фитосанитарного риска**

В имитационных исследованиях по определению будущих фитосанитарных рисков в условиях изменения климата, в основном, использовались модели распространения видов, модели динамики популяций, либо сочетания и тех, и других (таблица 2). Климатические факторы, рассматриваемые в этих исследованиях, включают температуру, осадки и влажность, однако увеличение концентрации CO<sub>2</sub>, как правило, не рассматривается (Eastburn, McElrone and Bilgin, 2011; Juroszek and von Tiedemann, 2015). Вероятно, легче спрогнозировать последствия изменения климата для тех видов вредных организмов, основное влияние на которые оказывает температура. Сложнее сделать прогноз по вредным организмам, размножение и распространение которых в значительной степени зависят от водообеспеченности, ветра и управления растениеводством. Также это касается вредных организмов, на которые значительное влияние оказывает взаимодействие с другими организмами, такими как переносчики патогенов (Trebicki and Finlay, 2019), за исключением случаев, когда такое взаимодействие хорошо изучено (Juroszek and von Tiedemann, 2013a) и поэтому предсказуемо (см. конкретный пример по *Xylella fastidiosa*).

Результат имитационного моделирования зависит от используемых материалов и методов, включая используемую глобальную климатическую модель, сценарии выбросов, региональную климатическую модель, а также модель по конкретному вредному организму, наряду с точными параметрами, используемыми в имитационном моделировании (Miedaner and Juroszek, 2021a). Все это способствует прогнозированию фитосанитарных рисков (Gouache *et al.*, 2013; Juroszek and von Tiedemann, 2013b; Launay *et al.*, 2020), и об этом не следует забывать при чтении и интерпретировании результатов исследований с имитационным моделированием, которые приведены в таблице 2. Кроме того, следует отметить, что влияние изменения климата на фитосанитарный риск может быть разным на территории одной страны (например, долины – горы, север – юг, лето – зима, горячий и влажный сезон – холодный и сухой сезон), внимание к этому аспекту недавно было привлечено в работе Miedaner and Juroszek (2021a).

По данным Juroszek and von Tiedemann (2015), в целом, прогнозируемое изменение (увеличение или снижение) фитосанитарного риска будет иметь более выраженный характер к концу двадцать первого века, а не несколькими десятилетиями ранее, если основную роль в достижении результатов играет увеличение температуры. Это отражает тот факт, что прогнозируется более масштабное глобальное потепление к концу двадцать первого века по сравнению с его серединой или началом (например, повышение глобальной температуры на 3 °C, 2 °C и 1 °C, соответственно).

Прогнозируемые изменения фитосанитарного риска варьируются в соответствии с географическим местоположением (Sidorova and Voronina, 2020). Например, в одном из первых исследований с имитационным моделированием будущего фитосанитарного риска, вызванного условиями изменения климата, было рассчитано увеличение риска пирикулярноза риса, вызываемого грибом *Magnaporthe grisea*, в прохладных, субтропических районах возделывания риса, таких как Япония, тогда как во влажных теплых тропиках, например, на Филиппинах, в будущем прогнозируется снижение риска пирикулярноза риса (Luo *et al.*, 1995, 1998). Что касается насекомых-вредителей, по прогнозам, сделанным в работе

Kostánková *et al.* (2011), в результате прогнозируемого увеличения температуры стеблевой кукурузный мотылек (*Ostrinia nubilalis*) и колорадский жук (*Leptinotarsa decemlineata*), вероятно, расширят границы своих ареалов во многих частях Европы, поселятся выше над уровнем моря, а также увеличат количество поколений в год. С другой стороны, потепление климата может привести к росту температур до уровней, близких к смертельному пределу для некоторых видов насекомых, особенно летом в умеренном климате (Bale and Hayward, 2010; Harvey *et al.*, 2020) и в уже крайне теплых тропиках (Deutsch *et al.*, 2008). Такое колебание воздействия в отношении географического местоположения означает, что к обобщениям следует относиться весьма осмотрительно, а ученым необходимо быть очень внимательными при экстраполяции результатов (Juroszek *et al.*, 2020).

Не так давно была опубликована работа Seidl *et al.* (2017), содержащая всеобъемлющий, глобальный анализ имеющихся результатов (более 1 600 единичных наблюдений). В ней сделан вывод, что около одной трети всех наблюдений показывает, что в лесном хозяйстве по всему миру увеличится риск возникновения факторов абиотического (например, пожар, засуха) и биотического (например, насекомые-вредители, патогены) стресса. Более теплые и сухие условия благоприятствуют воздействию насекомых, тогда как более теплые и влажные условия благоприятствуют воздействию патогенов. Такая же тенденция ожидается в отношении многих болезней сельскохозяйственных культур (например, Juroszek and von Tiedemann, 2015), насекомых-вредителей (например, Choudhary, Kumari and Fand, 2019), а также сорных растений (например, Clements, DiTommaso and Huvönen, 2014), причем в большинстве случаев возрастает фитосанитарный риск. Таким образом, в будущем с целью снижения прогнозируемого увеличения фитосанитарного риска в сельском хозяйстве, садоводстве, лесном хозяйстве, а также в озеленении городских территорий и в национальных парках, необходимо принимать профилактические меры, меры по смягчению последствий и меры по адаптации (Edmonds, 2013; Pautasso, 2013). В настоящее время между движениями за охрану окружающей среды и службами охраны здоровья растений ведется непрекращающаяся дискуссия о том, как проводить обработку в национальных парках и на охраняемых территориях при нашествии вредных организмов, а также по болезненному вопросу о том, вмешиваться ли в экосистемы, которые в настоящее время не являются управляемыми.

## Влияние на виды вредных организмов

Влияние изменения климата на виды вредных организмов многогранно и включает непосредственные и косвенные воздействия и их возможные взаимодействия. В конкретном месте сдвиг в потеплении и других климатических и атмосферных условиях может привести к непосредственному или косвенному воздействию на насекомых-вредителей, патогены и сорные растения. К возможному непосредственному и косвенному воздействию на вредные организмы относится следующее: изменения в их географической распространенности, в частности, расширение или сужение ареала либо увеличение риска интродукции вредного организма; изменения в фенологии, в частности, изменение сроков весенней активности или синхронизация событий жизненного цикла вредных организмов с жизненными циклами растений-хозяев и естественных врагов; а также изменения в популяционной динамике, такие как перезимовка и выживаемость, темпы роста численности или количество поколений полициклических видов (Juroszek and von Tiedemann, 2013a; Richerzhagen *et al.*, 2011).

В целом, на все важные стадии жизненного цикла насекомых-вредителей, патогенов и сорных растений (выживаемость, размножение и распространение) в большей или меньшей степени **непосредственное** влияние оказывает температура, относительная влажность, качество или количество света, а также ветер, либо любое сочетание этих факторов. Физиологические процессы большинства видов вредных организмов особенно восприимчивы к температуре



(Juroszek *et al.*, 2020). Например, на вирусы растений и насекомых-переносчиков особо благоприятное воздействие могут оказывать высокие температуры до того момента, пока не будет достигнут верхний температурный предел (Trebicki, 2020). В трехлетнем полевом эксперименте на посадках кукурузы в условиях тропического климата, как отмечается в работе Reynaud *et al.* (2009), было продемонстрировано, что случаи возникновения полосатости кукурузы (вызываемой вирусом полосатости кукурузы) и численность переносчика – цикадки *Cicadulina mbila* – были тесно связаны с температурой, быстро увеличиваясь при температуре выше 24 °С, однако температура 30 °С и выше может оказать неблагоприятное воздействие на цикадку и соответствующую передачу вируса (Juroszek and von Tiedemann, 2013c). Поэтому можно ожидать, что глобальное потепление будет способствовать распространению многих насекомых-переносчиков и вирусов, которые они передают, по крайней мере, в определенном диапазоне температур.

**Косвенное** воздействие имеет место через растение-хозяина либо в результате вызванной изменением климата адаптации в сфере управления растениеводством (Juroszek *et al.*, 2020). Более теплые средние температуры воздуха, особенно ранней весной в условиях умеренного климата, могут привести к тому, что стадии жизненного цикла растений-хозяев будут протекать раньше (Racca *et al.*, 2015). Это может повлиять на патогены, которые заражают растение-хозяина на определенной стадии жизненного цикла, например, на возбудителей болезней пшеницы, таких как виды *Fusarium*, заражающие пшеницу во время цветения (Madgwick *et al.*, 2011; Miedaner and Juroszek, 2021a). Адаптация в сфере управления растениеводством, вызванная изменением климата, включает внедрение орошения, отказ от глубокой обработки почвы, смещение сроков посева, а также выращивание больше одной культуры в год. Орошение кукурузы в юго-восточной части Африки, например, позволило выращивать кукурузу круглый год, однако также способствовало увеличению популяций насекомых-переносчиков, что в результате привело к увеличению воздействия вируса полосатости кукурузы на орошаемых полях, а впоследствии и на неорошаемых полях (Shaw and Osborne, 2011).

**Взаимодействие** факторов, влияющих на вредные организмы, может быть сложным. Например, эксперименты в реальных полевых условиях с использованием метода FACE показали многогранность взаимодействия между ростом сорняков и температурой, водой и концентрацией CO<sub>2</sub> в измененных условиях окружающей среды (Williams *et al.*, 2007), в свою очередь, другие эксперименты продемонстрировали, что стресс, вызванный недостатком воды, может изменить конкурентные отношения между сорными и сельскохозяйственными растениями с точки зрения их реакции на повышение концентрации CO<sub>2</sub> (Valerio *et al.*, 2011). В условиях хорошего полива томат (*Lycopersicon esculentum*), относящийся к C<sub>3</sub>-растениям, выигрывает в росте при увеличении концентрации CO<sub>2</sub> по сравнению с сорняком *Amaranthus retroflexus*, относящимся к C<sub>4</sub>-растениям, тогда как в условиях водного стресса при увеличении концентрации CO<sub>2</sub> большую пользу получает *A. retroflexus* по сравнению с томатом. Следовательно, такие эксперименты (Valerio *et al.*, 2011; Williams *et al.*, 2007), проводимые как в контролируемых, так и в полевых условиях, показывают, что невозможно предсказать реакцию растений на увеличение концентрации CO<sub>2</sub> только исходя из типа пути фотосинтетического метаболизма (C<sub>3</sub> или C<sub>4</sub>), поскольку существуют сложные взаимодействия, в том числе, с такими факторами, как водообеспеченность и температура. Эти выводы соответствуют недавно опубликованному мета-анализу (Vilà *et al.*, 2021), который был специально проведен для изучения совокупного влияния сорных растений и изменения климата на сельскохозяйственные культуры.

## Анализ конкретных примеров по отдельным видам вредных организмов

Некоторые вредные организмы уже расширили спектр своих хозяев или распространенность, по крайней мере отчасти, вследствие изменения климата. Ниже описываются примеры таких вредных организмов, выбранных в зависимости от их вредоносности в различных географических зонах. Примеры некоторых возможных последствий воздействия изменения климата на вредные для растений организмы (насекомых, патогены и сорные растения) в различных климатических зонах приведены в таблице 3.

### Насекомые

#### 1. Ясеновая изумрудная златка (*Agrilus planipennis*) (Азия, Европа, Северная Америка)

Ясеновая изумрудная златка *Agrilus planipennis* – жук-лубоед, заселяющий ясени (*Fraxinus* spp.) (EPPO, 2021b). Взрослые особи питаются листьями ясеня, однако именно из-за того, что личинки экстенсивно питаются флоэмой и камбрием, нарушается передвижение веществ в дереве, дереву наносятся кольцевые повреждения (т.е. повреждение кольца коры по всей окружности ветки или ствола), и, в конечном итоге, оно погибает.

Родом из северо-восточной части Китая, с Корейского полуострова и востока Российской Федерации, ясеновая изумрудная златка распространилась в другие части Азии, Северную Америку (Канаду и Соединенные Штаты Америки) (Naask *et al.*, 2002) и в Европу (в частности, в западную и южную части Российской Федерации и Украину) (CABI, 2021b). Например, этот вредитель, вероятно, был интродуцирован в Северную Америку в 2002 году с древесными упаковочными материалами. Дендрологические исследования показывают, что он прибыл на континент приблизительно за десятилетие до своего обнаружения. Последующему распространению этого жука в различные части Соединенных Штатов Америки и Канады, вероятно, способствовало перемещение зараженных семян, бревен и топливной древесины (Herms and McCullough, 2014; Ramsfield *et al.*, 2016).

Этот вредитель оказывает разрушительное воздействие. По мнению Aukema *et al.* (2011), это самое вредоносное и дорогостоящее инвазивное лесное насекомое в Соединенных Штатах Америки, экономические потери из-за которого, по прогнозам, к 2020 году превысят 12,5 млрд. долларов США. Нашествие этого жука также серьезно отразилось на биоразнообразии в зараженных зонах, поскольку ясени служат источником пищи, укрытием и средой обитания для многих видов. Более того, нашествие ясеновой изумрудной златки и последующая потеря деревьев позволяет говорить о возможных последствиях для здоровья человека (Donovan *et al.*, 2013). Стратегии борьбы направлены на локализацию, например, посредством использования карантинных зон, и на сокращение плотности популяций, в частности, путем интродукции агентов биологической борьбы. Изначально предпринимались попытки ликвидации, но позднее от нее отказались (Herms and McCullough, 2014).

Распространенность ясеновой изумрудной златки, в основном, ограничивается местами произрастания ясеня, тем не менее, считается, что климат также играет важную роль. В своем родном ареале ясеновая изумрудная златка живет только в части ареала произрастания ясеня, однако моделирование, описанное в работе Liang and Fei (2014), показывает, что изменение климата приведет к распространению этого жука в более северных районах Северной Америки и последующему долговременному риску для ясеня в этих районах. Однако ожидается, что продвижение ясеновой изумрудной златки на юг Северной Америки будет ограничено рамками условий потепления климата, поскольку этому жуку требуются ярко выраженные сезонные изменения с долгим зимним периодом. Описанное в работе Duan *et al.* (2020) исследование зимней выживаемости личинок нескольких интродуцированных видов паразитоидов



ясеновой изумрудной златки после экстремального климатического явления (низких зимних температур) также показало, что экстремальные климатические явления, связанные с изменением климата, могут снизить эффективность биологической борьбы с этим жуком.

## 2. Мухи-пестрокрылки (во всем мире)

Мухи-пестрокрылки – это семейство разнообразных насекомых, в которое входит более 4 тыс. описанных видов. Большая часть видов питается растениями, а некоторые могут наносить существенный экономический ущерб, особенно в случае, когда их личинки развиваются в плодах, имеющих высокую рыночную ценность. В семейство входит несколько инвазивных видов, например, *Bactrocera oleae* (Gutiérrez et al. 2009), к кормовой базе этого вида относятся только оливковые деревья (и некоторые дикорастущие родственники), *Bactrocera dorsalis*, поражающая несколько десятков видов плодовых растений, и средиземноморская муха *Ceratitis capitata*, повреждающая некоторое число древесных культур.

Мухи-пестрокрылки смогли распространиться на новые территории из своего первичного ареала и заселили как соседние районы, так и новые регионы, благодаря расширению зон выращивания их растений-хозяев, международной торговле, а также благодаря тому, что изменение климата позволило им выживать зимой и размножаться в средах обитания, которые иначе были бы для этих видов непригодны. *Bactrocera oleae* присутствует в Африке, Европе и Азии, а также недавно распространилась в Калифорнии и Мексике (CABI, 2021c). Однако в работе Godefroid et al. (2015) был сделан вывод, что этот вид может акклиматизироваться не только в средиземноморских регионах с умеренным климатом, но и в более прохладном климате северных широт Европы, где оливковые деревья еще предстоит выращивать.

*Bactrocera dorsalis* – вредитель, вызывающий серьезное беспокойство на всей территории юго-восточной Азии и западнее до Пакистана, а также с севера до юга Китая и Непала. Сообщается о его обнаружении в других зонах, в том числе на большей части территории Африки, на востоке Соединенных Штатов Америки и на нескольких островах Тихого океана (EPPO, 2021c). Поскольку у этой мухи более широкий спектр растений-хозяев, ее часто выявляют на международных рынках. Так как *B. dorsalis* может обитать, главным образом, в тропиках и субтропиках, и считается, что требования для ее выживания – довольно сложные, то риск непосредственного экономического ущерба в случае возникновения первичного очага в зонах с умеренным климатом – низкий, однако изменение климата вследствие глобального потепления может способствовать стремительному увеличению популяций этой мухи в мягком климате с учетом того, что зимовать она будет в защищенных условиях в плодах, которые хранятся в закрытых местах (EPPO, 2021c). Также это относится и к *C. capitata*, распространенной на юге и в центре Европы, на большей части территории Африки и на Ближнем Востоке, в Центральной и Южной Америке, а также в Западной Австралии, однако ее личинки также могут зимовать в более холодных регионах в плодах, которые хранятся в теплом месте. Она может распространяться в процессе международной торговли апельсинами, мандаринами и лимонами (Fedchock et al., 2006).

## 3. Красный пальмовый долгоносик (*Rhynchophorus ferrugineus*) (Ближний Восток, Африка, Европа)

Красный пальмовый долгоносик *Rhynchophorus ferrugineus* относится к насекомым-вредителям пальм, наносящим наибольший экономический ущерб. Его родина – юго-восточная часть Азии и Меланезия. Личинки этого долгоносика питаются внутри конуса нарастания дерева, существенно повреждая ткань растения, ослабляя его структуру и во многих случаях приводя к гибели. В странах Персидского залива на Ближнем Востоке ежегодные потери вследствие гибели и уничтожения пальм, сильно зараженных красным пальмовым долгоносиком, оцениваются от 5,2 млн. до 25,9 млн. долларов США при уровне заражения 1 и 2 процента, соответственно (El-Sabea, Faleiro and Abo-El-Saad, 2009). По другим оценкам ежегодные потери из-за красного пальмового долгоносика составляют 15 млн. долларов США (Al-Ayedh, 2017).

Красный пальмовый долгоносик наносит вред разным видам пальм, в том числе кокосовой и финиковой пальмам (El-Mergawy and Al-Ajlan, 2011; FAO, 2020). Впервые заражение финиковых пальм на Ближнем Востоке было обнаружено в середине 1980-х, и впоследствии этот вредитель распространился по территории других стран Ближнего Востока, Африки и Европы. В 2010 году его выявили в Калифорнии в Соединенных Штатах Америки, и в 2015 году было объявлено о его ликвидации. Его распространению по всему миру, вероятно, способствовало перемещение отводков пальмы в качестве посадочного материала. Стратегии борьбы заключаются в использовании различных агротехнических и фитосанитарных мер, таких как уничтожение зараженных деревьев, применение инсектицидов и энтомопатогенных нематод, а также использование феромонных ловушек (FAO, 2020; Ge *et al.*, 2015).

Из-за изменения климата может расширяться распространенность красного пальмового долгоносика. В работе Ge *et al.* (2015) делается прогноз, что в Китае с изменением климата вырастет число крайне благоприятных для этого вредителя зон, что приведет к его распространению в северной части Китая. Красный пальмовый долгоносик – единственный вид семейства *Rhynchophorus*, значительно расширивший свой первоначальный ареал в Южной и Юго-Восточной Азии (Wattanapongsiri, 1966). Сообщается о его присутствии в 45 странах, а моделирование экологической ниши показывает, что этот вредитель будет и дальше расширять свой ареал (Fiaboe *et al.*, 2012). Красный пальмовый долгоносик все еще считается серьезной проблемой растениеводов, занимающихся выращиванием пальм на Ближнем Востоке, и, несмотря на интегрированные меры борьбы, он все еще вызывает огромные экономические потери.

#### 4. Кукурузная листовая совка (*Spodoptera frugiperda*) (Северная и Южная Америка, Африка, Азия)

Кукурузная листовая совка (*Spodoptera frugiperda*) – это совка, относящаяся к семейству Noctuidae (рис. 7). Спектр ее растений-хозяев исчисляется сотнями видов растений, она наносит серьезный ущерб травам, особенно кукурузе и сорго, которым она отдает предпочтение, а также другим сельскохозяйственным культурам, в частности, рису, хлопку и сое, которые предпочитают разные расы этого вида. Ее родина – тропические и субтропические зоны Северной и Южной Америки, а летом она мигрирует в южные и северные части американских континентов с умеренным климатом. Впервые этого вредителя обнаружили на западе Африки в 2016 году (Goergen *et al.* 2016), а затем в странах Африки к югу от Сахары и в Египте в 2019 году. В 2018 году сообщалось о присутствии кукурузной листовой совки в Индии, она стремительно распространилась по всей южной и восточной части Азии, включая Китай, Республику Корея, Японию и Пакистан. Также сообщалось о ее присутствии в Бангладеш, Индонезии, Мьянме, Шри-Ланке, Таиланде, Филиппинах, Вьетнаме и Йемене (EPPO, 2020a). В 2020 году кукурузная листовая совка была впервые обнаружена на посевах кукурузы в Иордании и Объединенных Арабских Эмиратах (IPPC Secretariat, 2020a; 2020b), а также в Израиле (EPPO, 2020b). Также она распространилась по территории Австралии (IPPC Secretariat, 2021).

Кукурузная листовая совка приспособлена к теплему климату и не может входить в состояние диапаузы, ее географическая распространенность в значительной степени зависит от климатических условий. Взрослые особи могут преодолевать до нескольких километров за одну ночь, а во время сезонной миграции долетать до Канады из южной части Соединенных Штатов Америки. В работе Ramirez-Cabral, Kumar and Shabani (2017) отмечается расширение ее ареала в более теплом климате благодаря приспособляемости к различной среде, хорошей способности к распространению, широкому спектру потенциальных хозяев и активной международной торговле товарами, которые личинки или куколки совки могут поражать. Также прогнозируется сокращение популяции или даже частичное исчезновение этого вида в южной части Западного полушария вследствие того, что в середине и конце этого века ожидаются более теплые и сухие условия на севере этого субконтинента. В Европейском союзе в некоторых теплых районах Испании, Италии и Греции могли бы возникнуть подходящие климатические условия для акклиматизации этого вида, особенно популяций, обосновавшихся на севере Африки (Jeger *et al.*, 2018).



## 5. Пустынная саранча (*Schistocerca gregaria*) (Африка, Западная и Южная Азия)

Пустынная саранча (*Schistocerca gregaria*), в основном, присутствует в Африке, на территории Аравии и Западной Азии, в отдельных частях Южной Азии (FAO, 2021a). Сообщается о ее периодическом обнаружении на юго-западе Европы. Она роится и неистово уничтожает такие ключевые сельскохозяйственные культуры, как кукуруза и сорго, пастбища и всю зеленую растительность, которая встречается на ее пути, тем самым нанося значительный ущерб мелким фермерам и скотоводам (Kimathi *et al.*, 2020).

Пустынная саранча демонстрирует периодическое изменение формы тела и от поколения к поколению может меняться в ответ на условия окружающей среды, превращаясь из обособленных, высоко плодовитых, немигрирующих насекомых в скопление мигрирующих особей, которые могут перемещаться на большие расстояния, в конечном итоге вторгаясь на новые территории. Как правило, пустынная саранча активно размножается в полусухих зонах, занимая территории с запада Африки через Ближний Восток до юго-запада Азии и представляя угрозу для обеспечения людей средствами к существованию в более чем 65 странах. Однако существует гораздо менее известный подвид – *S. gregaria flaviventris*, который обитает на ограниченной территории в южной части Африки, и необходимо изучить потенциал этого подвида представлять угрозу в будущем (Meynard *et al.*, 2017).

В течение многих веков регистрировались крупные очаги пустынной саранчи, и FAO ведет базу данных по многолетнему, крупномасштабному мониторингу в зараженных зонах. Важно определять потенциальные места размножения этого вредителя, если планируется принимать малозатратные и своевременные профилактические меры до того, как этот вредитель нанесет значительный ущерб (Kimathi *et al.*, 2020). С 1960-х годов очаги возникали реже, однако в 2019-2020 гг. беспрецедентное размножение наблюдалось в Эритрее, Сомали и Йемене по причине необычайно сильных ливней в регионе Африканского Рога. Применяемая в настоящее время стратегия борьбы с роями саранчи заключается в аэроопрыскивании химическими пестицидами, что оказывает крайне неблагоприятное воздействие на людей, сельскохозяйственных животных, окружающую среду и биоразнообразие.

Поведение, экология и физиология пустынной саранчи меняется в ответ на некоторые климатические условия. Сложно объяснить отдельно взятое явление изменением климата, однако такие климатические изменения, как увеличение температуры и дожди в пустыне, а также сильные ветры, связанные с тропическими циклонами, создают новую благоприятную среду для размножения, развития и миграции этого вредителя. Это позволяет предположить, что глобальное потепление сыграло свою роль в создании условий, необходимых для развития, возникновения очагов и выживания саранчи. Однако влияние изменения климата имеет сложный характер, и поэтому Комиссия FAO по борьбе с пустынной саранчей в Юго-Западной Азии (FAO, 2021a) отметила необходимость международного сотрудничества между зараженными странами в целях устранения угрозы, представляемой саранчей. Куда она полетит дальше, зависит от направления и скорости ветра, а также других погодных условий. Следовательно, изменение климата может повлиять на будущие пути миграции пустынной саранчи. Однако при прогнозировании риска в различных сценариях изменения климата, может потребоваться разграничение разных подвидов, поскольку они могут иметь разные требования к экологическим нишам.

**Таблица 3** Примеры некоторых возможных последствий воздействия изменения климата на вредные для растений организмы (насекомых, патогены и сорные растения) в разных климатических зонах

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ	ВОЗМОЖНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА БУДУЩИЙ ФИТОСАНИТАРНЫЙ РИСК (ГЛАВНЫМ ОБРАЗОМ, В 2050–2100 ГГ.)	БИБЛИОГРАФИЯ
Арктическая	Возрастает фитосанитарный риск в тундре	Revich, Tokarevich and Parkinson, 2012.
Северная	Возрастает риск, представляемый насекомыми-вредителями и болезнями растений, в северных лесах	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
Умеренная	Возрастает риск, представляемый насекомыми-вредителями, в сельском и лесном хозяйстве	Grünig <i>et al.</i> , 2020.
	Возрастает риск, представляемый насекомыми-вредителями и болезнями растений, в лесах	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
	Возрастает риск, представляемый болезнями, в сельском хозяйстве и садоводстве (главным образом, по результатам западноевропейских исследований)	Juroszek and von Tiedemann, 2015; Miedaner and Juroszek, 2021a.
	Во многих случаях сдвиг риска, представляемого насекомыми-вредителями и патогенами, в сторону полюса в различных управляемых и неуправляемых экосистемах	Bebber, Ramotowski and Gurr, 2013.
	Во многих случаях расширение ареала наносящих экономический ущерб насекомых-вредителей в сельском хозяйстве и садоводстве	Choudhary, Kumari and Fand, 2019.
	Возрастает риск, представляемый сорными растениями, в различных управляемых и неуправляемых экосистемах	Clements, DiTommaso and Hyvönen, 2014.
Субтропическая	В Южной Европе возрастает предельный риск, представляемый насекомыми-вредителями, в сельском и лесном хозяйстве	Grünig <i>et al.</i> , 2020.
	Возрастает риск, представляемый болезнями, в сельском хозяйстве и садоводстве	Gullino <i>et al.</i> , 2018.
	Во многих случаях расширение ареала наносящих экономический ущерб насекомых-вредителей в сельском хозяйстве и садоводстве	Choudhary, Kumari and Fand, 2019.
Тропическая	В будущем насекомые будут часто сталкиваться с температурным режимом, превышающим оптимальные параметры, что, предположительно, приведет к снижению представляемого ими риска	Deutsch <i>et al.</i> , 2008.
	Снижение риска, представляемого болезнями, в сельском хозяйстве и садоводстве (по результатам бразильских исследований методом имитационного моделирования); однако также возрастает риск, представляемый болезнями (на основе имитационного моделирования и экспертных заключений) (например, из-за результатов в зависимости от местоположения)	Angelotti <i>et al.</i> , 2017; Ghini <i>et al.</i> , 2011; Juroszek and von Tiedemann, 2015.

**Примечания:** Материал взят из источников (примеров), в которых анализируются или обобщаются многие или, по меньшей мере, некоторые результаты, полученные в рамках одной или нескольких дисциплин. Большая часть результатов относится к Северному полушарию, особенно, к умеренной зоне. В Индии уже наблюдается увеличение рисков, представляемых насекомыми-вредителями, однако при этом не указывается в какой именно климатической зоне (например, Rathee and Dalal, 2018).



Рисунок 7

А



*Spodoptera frugiperda*, кукурузная листовая совка (Lepidoptera: Noctuidae)  
(а) Поврежденный гусеницами початок кукурузы; (б) гусеница и повреждение кукурузы на стадии выметывания.

Б



Источник: EPPO (2020b); любезно предоставлено Б.Р. Уайзманом, Министерство сельского хозяйства США/Служба сельскохозяйственных исследований, Тифтон (Соединенные Штаты Америки).

## Возбудители болезней растений

### 6. Ржавчина кофейного дерева (*Hemileia vastatrix*) (Африка, Азия, Латинская Америка)

Ржавчина кофейного дерева, вызываемая *Hemileia vastatrix*, является одним из основных факторов, ограничивающих урожайность кофе арабика по всему миру. Ранние и крайне агрессивные вспышки болезни за последние несколько лет привели к серьезным потерям (до 50-60 процентов урожая) в некоторых странах Латинской Америки, таких как Колумбия и Мексика.

По всей видимости, климат играет некоторую роль в распространении этой болезни. Одним из факторов, способствовавших возникновению эпидемии ржавчины в Центральной Америке, стало уменьшение суточной амплитуды температур, что сократило латентный период болезни (Avelino *et al.*, 2015). Более короткий латентный период способствует быстрому увеличению популяции патогена. Аналогичным образом при глобальном потеплении может сократиться его инкубационный период. Анализ, проведенный в работе Ghini *et al.* (2011) в отношении будущих сценариев изменения климата в Бразилии, свидетельствует о тенденции сокращения инкубационного периода *H. vastatrix*, и это означает, что в течение одного вегетационного периода сможет развиться больше поколений этого патогена. Следовательно, в будущем может возрасти риск эпидемии ржавчины кофейного дерева при отсутствии прочих факторов, снижающих риск болезни, таких как снижение способности патогена к заражению кофейных деревьев. Менее холодные зимы могут привести к увеличению количества инокулята, упрощая заражение патогеном (Avelino *et al.*, 2015), но холодные температуры могут не представлять проблемы для этого патогена, учитывая тот факт, что в Африке перенос производства кофе в более прохладные районы, расположенные выше над уровнем моря, не ограничил распространение ржавчины кофейных деревьев, поскольку этот патоген уже был широко распространен (Iscaro, 2014), и он может адаптироваться к разным климатическим условиям (Avelino *et al.*, 2015). Таким образом, ржавчина кофейного дерева представляла и продолжает представлять одну из крупнейших проблем для мирового производства кофе, и потребуется выработка новых стратегий для обеспечения борьбы с ней, особенно в случае, если изменение климата повлияет на биологию этого патогена так, как указано в этих исследованиях.

### 7. Фузариозное увядание бананов (*Fusarium oxysporum f. sp. cubense*) тропической расы 4 (Австралия, Мозамбик, Колумбия, Азия, Ближний Восток)

Передающийся через почву гриб *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* вызывает фузариозное увядание бананов. Выходом, найденным для борьбы с уничтожением бананов расой 1 патогена, стала посадка устойчивого культивара «кавендиш» (Ploetz, 2005; Stover, 1986). Однако новый штамм *F. oxysporum* – тропическая раса 4 (TR4) – был обнаружен в 1990 году в Восточной Азии, некоторых частях Юго-Восточной Азии и в Северной Австралии. Он поражал клоны культивара «кавендиш» в тропиках (Ploetz, 2005; Ploetz and Pegg, 2000). С 2010 года эта раса распространилась в странах Южной и Юго-Восточной Азии (Вьетнам, Индия, Лаосская Народно-Демократическая Республика, Мьянма и Пакистан), на Ближнем Востоке (Израиль, Иордания, Ливан и Оман), в Африке (Мозамбик) (Dita *et al.*, 2018) и Южной Америке (Колумбия) (García-Bastidas *et al.*, 2019). Эта болезнь представляет огромную угрозу для производителей бананов «кавендиш» по всему миру, вне зависимости от того, являются они мелкими или крупными фермерами (Mostert *et al.*, 2017). Высокие температуры, например, при повышении с 24 до 34 °С, и экстремальные погодные явления, включая циклоны и тропические штормы, могут увеличить риск болезни, особенно, когда растения бананов культивара «кавендиш» страдают из-за переувлажнения почвы (Pegg *et al.*, 2019; Peng, Sivasithamparam and Turner, 1999). Поскольку до сих пор не существует культиваров банана, устойчивых к TR4, и химическая борьба с патогеном не эффективна, единственный путь управления риском фузариозного увядания бананов (TR4) – применение профилактических мер. Они включают,



к примеру, использование свободного от болезни посадочного материала культивара «кавендиш», раннее выявление и уничтожение заболевших растений, как только замечаются симптомы фузариозного увядания (Pegg *et al.*, 2019).

## 8. *Xylella fastidiosa* (Северная и Южная Америка, Южная Европа, Ближний Восток)

*Xylella fastidiosa* – граммотрицательная бактерия, поражающая ксилему. Она вызывает болезни экономически значимых культур, таких как виноград, цитрусовые, оливки, миндаль, персик и кофе, а также декоративных и лесных растений (Janse and Obradovic, 2010; Wells *et al.*, 1987). Сообщалось о ее обнаружении в Северной и Южной Америке, а также в Азии, в 1980-х годах (Cornara *et al.*, 2019). В 2013 году *X. fastidiosa* subsp. *pauca* поразила оливковые деревья на юге Италии, что привело к серьезным потерям и существенно изменило типичный местный ландшафт, поскольку этот патоген уничтожил столетние оливковые деревья (Saponari *et al.*, 2013). *X. fastidiosa* переносится многочисленными видами сокососущих прыгающих насекомых, включая пенниц и цикадок, в основном, относящихся к семействам Aphrophoridae и Cicadellidae (Almeida *et al.*, 2005; Cornara *et al.*, 2019).

Модели биоклиматической распространенности видов показывают, что *X. fastidiosa* имеет потенциал расширить зону своей текущей распространенности и может распространиться в других районах Италии и в других странах Европы (Bosso *et al.* 2016; Godefroid *et al.*, 2018). Идентифицированы разные подвиды этой бактерии: в основном, *fastidiosa*, *multiplex* и *pauca*. По прогнозам, полученным в результате моделирования, подвид *multiplex* и в некоторой степени подвид *fastidiosa* представляют угрозу для большей части территории Европы, тогда как зоны с подходящим для подвида *pauca* климатом, в основном, ограничены территорией средиземноморских стран (Godefroid *et al.*, 2019). Прогностическая модель ранжирования рисков, примененная в недавнем исследовании Frem *et al.* (2020), показала, что бассейн Средиземного моря, особенно Ливан, подвергается наибольшему риску акклиматизации и распространения *X. fastidiosa*. Даже несмотря на то, что многие средиземноморские страны в настоящее время свободны от *X. fastidiosa*, в ближайшем будущем они будут подвержены высокому риску проникновения и акклиматизации *X. fastidiosa*: Турция больше всего подвержена риску, затем следуют Греция, Марокко и Тунис, для которых степень риска классифицируется как высокая. Только три страны в этом регионе (Бахрейн, Ливия и Йемен) в наименьшей степени подвержены риску в части, касающейся возможного проникновения, акклиматизации и распространения бактерии. Примечательно, что эта проблема не ограничивается средиземноморским регионом. По симптомам болезни и результатам лабораторных анализов было выявлено, что *X. fastidiosa* связана с ожогом листьев миндаля и болезнью Пирса в виноградарских нескольких провинций Исламской Республики Иран (Atapifar *et al.*, 2014), это говорит о том, что она начнет распространяться на Ближнем Востоке по территориям соседних стран.

В работе Bosso *et al.* (2016) прогнозируется, что изменение климата в будущем не приведет к дальнейшему увеличению риска *X. fastidiosa* в большей части средиземноморского региона, однако при прогнозировании риска также следует учитывать полную взаимосвязь «хозяин – переносчик – бактерия». К счастью, активность переносчиков, вероятно, снизится из-за температуры, превышающей оптимальные параметры, и неблагоприятных условий влажности, что недавно было смоделировано в работе Godefroid *et al.* (2020).

Борьба с *X. fastidiosa* будет основываться на выработке эффективных стратегий интегрированной защиты растений, включая совершенствование процесса выявления патогена и насекомых-переносчиков, эффективные методы сельскохозяйственного производства и последнее, но не менее важное – эффективные карантинные обработки для борьбы с распространением этого патогена.

## 9. Оомицеты, включая *Phytophthora infestans* и *Plasmopara viticola* (во всем мире)

Потенциальное распространение оомицетов в направлении полюса по причине изменения климата создаст проблему для растениеводства, главным образом, в северном полушарии (Bebber, Ramotowski and Gurr, 2013). *Phytophthora infestans* – оомицет, вызывающий фитофтороз картофеля и томата, обладает большой способностью адаптироваться к меняющимся условиям, что представляет собой важный фактор, определяющий риск тяжелой эпидемии в будущем. И действительно, по результатам нескольких исследований предполагается увеличение риска появления *P. infestans* в нескольких странах (Hannukkala *et al.*, 2007; Perez *et al.*, 2010; Skelsey *et al.*, 2016; Sparks *et al.*, 2014), что требует выработки новых стратегий борьбы с этой болезнью и сокращения ее воздействия на продовольственную безопасность, например, более позднее начало сезона выращивания картофеля (Skelsey *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2020).

Исследования в Египте, посвященные влиянию изменения климата на фитофтороз томата и картофеля, показали, как теплая погода зимой влияет на распространенность этой болезни и на борьбу с ней (Fahim, Hassanein and Mostafa, 2003; Fahim *et al.*, 2011). Отмечается, что начало эпидемии фитофтороза томата на одну или две недели раньше будет означать, что потребуются два или три дополнительных опрыскивания для обеспечения эффективной борьбы с этой болезнью. Поэтому в Египте потребуются до трех дополнительных опрыскиваний фунгицидами в течение каждого вегетационного сезона в предстоящие десятилетия (2025–2100 гг.). Что касается фитофтороза картофеля, вызываемого тем же патогеном, сравнение погодных условий и распространенности болезни во время вегетационных сезонов с эпидемией и без эпидемии показало, что влажные и теплые зимы способствуют развитию эпидемии фитофтороза картофеля в Египте. Благоприятные условия зимой способствуют накоплению инокулята патогена на ранних культиварах в начале вегетационного сезона, что приводит к тенденции проявления фитофтороза на более поздних посадках картофеля. Поэтому можно ожидать, что изменение климата будет способствовать эпидемии фитофтороза в будущем. Тем не менее, существует острая необходимость в проведении дальнейших оценок влияния изменения климата на болезни сельскохозяйственных культур в Египте и в других странах Ближнего Востока (Fahim *et al.*, 2011).

Ложная мучнистая роса винограда, которую вызывает оомицет *Plasmopara viticola*, – еще одна серьезная болезнь, приводящая к значительным производственным потерям от 5 до 30-40 процентов урожая в большинстве регионов выращивания винограда. В случае производства вина ложная мучнистая роса также влияет на его качество. Поскольку во многих из этих регионов умеренный климат с недостаточно оптимальными для патогена температурами, увеличение температуры воздуха окажет благоприятное воздействие на распространение болезни. Поэтому исследования, в которых рассматриваются будущие сценарии изменения климата, прогнозируют возникновение ранних очагов болезни, для борьбы с которыми потребуются больше обработок (Angelotti *et al.*, 2017; Salinari *et al.*, 2006, 2007). Краткосрочные исследования в фитотронах также подтвердили усиление степени воздействия ложной мучнистой росы винограда в смоделированных условиях изменения климата (Pugliese, Gullino and Garibaldi, 2010).



## 10. Грибы, вырабатывающие микотоксины (во всем мире)

В целом, ожидается, что изменение климата приведет к увеличению присутствия микотоксинов в сельскохозяйственных культурах, однако ввиду разнообразия грибной флоры, связанной с каждой отдельной культурой, и ее взаимодействий с окружающей средой сложно делать выводы без проведения конкретных исследований. Тем не менее, существует множество результатов. Например, в работе Battilani *et al.* (2016) отмечается, что в Европе глобальное потепление может расширить северные границы риска присутствия афлатоксина в кукурузе, а в работе Van der Fels-Klerx, Liu and Battilani (2016) была проведена количественная оценка влияния климата на появление микотоксинов. В работе Medina *et al.* (2017) рассматривается влияние изменения климата на микотоксичные грибы посредством изучения влияния трехстороннего взаимодействия между увеличением концентрации CO<sub>2</sub> (350–400 по сравнению с 650–1200 частей на миллион), повышением температуры (+2–5 °C) и вызванного засухой стресса на рост и выработку микотоксинов основными грибами, ухудшающими качество зерновых культур и орехов, включая виды *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium* и *Penicillium*. На рост *Aspergillus flavus*, вырабатывающего афлатоксин В1, по всей видимости, моделируемые условия изменения климата не оказывают влияния. Вместе с тем, в кукурузе была интенсифицирована выработка афлатоксина В1 как *in vitro*, так и *in vivo*. С другой стороны, поведение другого вида *Aspergillus*, приводящего к контаминации целого ряда товаров охратоксином А, а также *Fusarium verticillioides*, продуцирующего фуминозины, дает основание предполагать, что некоторые виды – более устойчивы к изменению климата, особенно в части выработки микотоксинов.

Изменение климата, наряду с воздействием на широко распространенные грибы, также может повлиять на выработку микотоксинов новыми патогенами, как экспериментально доказано в работе Siciliano *et al.* (2017a, 2017b) в отношении увеличения количества микотоксинов, продуцируемых видами *Alternaria* и *Myrothecium*. Более того, приспособление микотоксичных патогенных грибов к факторам изменения климата может привести к увеличению распространения болезни и, вероятно, к контаминации микотоксинами основных зерновых и других культур. Таким образом, управление рисками, связанными с микотоксинами, в будущем по-прежнему будет большой проблемой (Juroszek and von Tiedemann, 2013b), поскольку изменение климата может ухудшить ситуацию (Miedaner and Juroszek, 2021b).

## Нематоды

### 11. Нематода, повреждающая цитрусовые культуры (*Pratylenchus coffeae*) (по всему миру)

Нематода *Pratylenchus coffeae* широко распространена в цитрусовых насаждениях по всему миру. В основном, она заражает растение через питающие корни, по которым подвижные стадии нематоды проникают в кортикальную ткань. Сосудистая ткань остается неповрежденной до тех пор, пока другие организмы не заразят ее в качестве вторичной инфекции (Duncan, 2009). Известно, что нематода уменьшает вес корней цитрусовых наполовину, и при экспериментальном заражении молодых деревьев было установлено замедление роста на 49–80 процентов, при этом количество плодов сокращается в диапазоне от трех до двадцати раз (O’Vannon and Tomerlin, 1973). Результаты недавних исследований, посвященных текущему изменению климата в Египте, показывают, что более высокие температуры могут усугубить вред, наносимый этой нематодой корневой системе цитрусовых растений, поскольку скорость ее размножения выше всего при относительно высокой температуре почвы (26–30 °C) (Abd-Elgawad, 2020). При такой температуре завершение жизненного цикла нематоды занимает меньше месяца, и плотность ее популяции может достичь 10 тыс. нематод на грамм корня; эта нематода также может выживать в корнях в почве в течение не менее четырех месяцев. К сожалению, в продаже пока нет саженцев, устойчивых к этой нематоды (Abd-Elgawad, 2020).

## 12. Соевая цистообразующая нематода (*Heterodera glycines*) (по всему миру)

Соевая цистообразующая нематода (*Heterodera glycines*) – возбудитель болезни сои (*Glycine max*), наносящий самый большой экономический ущерб в Соединенных Штатах Америки и Канаде (Tylka and Marett, 2014). Она также вызывает значительные потери урожая во многих других странах – крупных производителях сои, таких как Аргентина, Бразилия и Китай. Таким образом, она способна вызвать серьезные потери урожая по всему миру.

Глобальное потепление, по всей видимости, будет способствовать расширению ареала нематоды на север (в северном полушарии) и на юг (в южном полушарии), а также увеличению количества поколений в течение сезона выращивания сои (St-Marseille *et al.*, 2019) до тех пор, пока не будут превышены оптимальные для нематоды температурные условия.

Самые важные стратегии борьбы с этим вредным организмом заключаются в использовании устойчивых культиваров (Shaibu *et al.*, 2020) и севооборота (Niblack, 2005). По данным Niblack (2005), севооборот включает не менее трех разных аспектов: в идеале, выращивание сои только один раз в пять лет на одном поле (хотя преимущество севооборота может уменьшиться, если присутствуют сорные растения, которые могут выступать в роли альтернативных хозяев нематоды); использование в широком севообороте сельскохозяйственных культур, в том числе покровных и промежуточных культур, не являющихся растениями-хозяевами; и посадка различных устойчивых или толерантных культиваров сои в разные годы на одном и том же поле с целью сведения к минимуму адаптационного потенциала популяций нематоды.

## 13. Сосновая стволовая нематода (*Bursaphelenchus xylophilus*) (Северная Америка и Восточная Азия)

По данным, приведенным в работе Jones *et al.* (2013), сосновая стволовая нематода *B. xylophilus* родом из Северной Америки, где она заражает сосны (виды *Pinus*), но не наносит им серьезного ущерба. Однако в неродной среде, включая Азию (Китай, Республика Корея, Япония и др.) и Европу (несколько случаев обнаружения в Португалии и Испании), это опасный вредный организм, убивающий миллионы сосен. Переносчик этой нематоды – взрослые особи жуков рода *Monochamus*, которые обитают в хвойных лесах и перелетают на большие расстояния. Ожидается, что глобальное потепление будет все больше благоприятствовать болезни увядания хвойных пород, поскольку жуки рода *Monochamus*, как и многие другие лесные насекомые (Seidl *et al.*, 2017), выиграют от роста температур, особенно в регионах с умеренным климатом (Ikegami and Jenkins, 2018). Целый ряд проведенных оценок риска показывает, что с увеличением температур участится гибель хвойных деревьев в регионах с умеренным климатом. В средиземноморском регионе, больше всего в Европе подверженном риску, масштабная гибель хвойных деревьев будет иметь серьезные последствия для окружающей среды.



### 14. Буддлея Давида (*Buddleja davidii*) (по всему миру)

Прогнозируется, что ареал инвазивного сорного растения *Buddleja davidii* в Европе, Северной Америке и Новой Зеландии расширится к концу двадцать первого века из-за ослабления ограничивающих рост факторов, связанных с холодным стрессом (Kriticos *et al.*, 2011). И наоборот, ареал этого сорняка в Африке, Азии, Южной Америке и Австралии, по прогнозам, уменьшится ввиду увеличения теплового стресса. В целом, прогнозируется сокращение общей площади земли с подходящими условиями произрастания этого сорняка, в среднем, на 11 процентов (8, 10 или 16 процентов в зависимости от используемого сценария изменения климата). К возможным стратегиям адаптации относится определение зон, в которых угроза инвазии возрастет и сократится, для того, чтобы можно было надлежащим образом распределить ресурсы на борьбу с целью ограничения дальнейшего распространения этого сорного растения (Kriticos *et al.*, 2011).

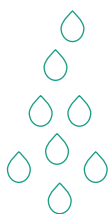
### 15. *Nassella trichotoma* (по всему миру)

В текущих климатических условиях сорная трава *Nassella trichotoma* имеет значительный потенциал к распространению. В будущем сохранятся возможности заселения новых территорий, которые являются подходящими, однако прогнозируется, что к концу двадцать первого века общая площадь подходящей земли во всем мире сократится на 20–27 процентов (в зависимости от используемого сценария изменения климата), в основном, в результате прогнозируемого увеличения теплового стресса (Watt *et al.*, 2011). К возможным стратегиям борьбы относятся: определение зон с высоким риском инвазии, применение мер по ограничению распространения семян человеком, а также применение мер борьбы с сорняком для ограничения распространения семян с ветром (Watt *et al.*, 2011).

# Профилактика, смягчение последствий и адаптация







Этот раздел посвящен обзору мер, которые можно применять в целях профилактики, смягчения последствий и адаптации к потенциальному воздействию изменения климата на вредные организмы и, как следствие, на здоровье растений. Поскольку между растительными экосистемами существуют взаимозависимости, приводится информация о видах вредных организмов и других видах (например, о видах полезных организмов или организмов, воздействие которых с экономической точки зрения неизвестно) в сельском хозяйстве, садоводстве, лесном хозяйстве и неуправляемых средах обитания, по двум основным причинам (Juroszek and von Tiedemann, 2013a). Во-первых, необходимо установить междисциплинарный подход к борьбе с вредителями и болезнями, поскольку знания, полученные в разных областях, могут быть взаимодополняющими, и поэтому необходимо ими обмениваться и использовать в рамках различных дисциплин (Jactel *et al.*, 2020; Wilkinson *et al.*, 2011). Во-вторых, многие виды вредных организмов, особенно подвижные вредители-генералисты, а также виды, не ограниченные определенной средой обитания, населяют как управляемые, так и неуправляемые экосистемы. Междисциплинарные подходы особенно важны, если виды вредных организмов меняют спектр своих растений-хозяев при перемещении из неуправляемых в управляемые экосистемы и наоборот, что приводит к появлению новых видов организмов, наносящих вред сельскохозяйственной культуре или в обратном порядке (Jones, 2016).

## Профилактические меры

Наиболее эффективный способ предотвращения и ограничения международного распространения вредных организмов в процессе торговли и перемещения пассажиров – регулирование их перемещения посредством фитосанитарных мер и обеспечение применения эффективных методов сельскохозяйственного производства, позволяющих сократить распространенность вредных организмов до низкого уровня.

### Нормативно-правовые аспекты

По данным Carvajal-Yepes *et al.* (2019) и Giovani *et al.* (2020), законодательство по фитосанитарному регулированию импорта – это первая линия защиты в части предотвращения международного распространения вредных организмов. Цель фитосанитарной системы регламентации импорта – предотвращение или ограничение интродукции регулируемых вредных организмов с импортируемыми товарами и другими подкарантинными материалами и пассажирами. Фитосанитарная система регламентации импорта, как правило, состоит из двух элементов: основных регулирующих положений фитосанитарного законодательства, регламентов и процедур; а также официальной службы – национальной организации по карантину и защите растений (НОКЗР), ответственной за действие системы или надзор за ней (МСФМ 20, 2019). НОКЗР имеет ряд обязательств в отношении функционирования фитосанитарной системы регламентации импорта, включая определенные обязательства, установленные п. 2 статьи IV МККЗР (Секретариат МККЗР, 1997). В частности, в отношении импорта, кроме всего прочего, к ним относятся: надзор, досмотр, проведение АФР, а также обучение и развитие штата сотрудников.

Для сохранения эффективности фитосанитарной системы регламентации импорта крайне важно иметь возможности для проведения качественной оценки риска и использовать их для оценки сценариев потенциального риска, учитывая изменение климата. Также важное значение будет иметь реализация эффективных и налаженных мероприятий по надзору и мониторингу. Официальным службам потребуется более тщательно проводить обследования и мониторинг как с целью раннего выявления новых интродукций (в том числе по причине меняющихся климатических параметров), так и для определения статуса вредных организмов, а также для возможности быстрого реагирования (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019; Lopian, 2018; Giovani *et al.*, 2020; STDF/World Bank, 2011).

## Анализ фитосанитарного риска

Краеугольным камнем любой эффективной фитосанитарной системы регламентации импорта является наличие АФР, проведенного НОКЗР. Анализ фитосанитарного риска обеспечивает НОКЗР обоснованием фитосанитарных мер, направленных на предотвращение интродукции вредных организмов, посредством оценки научных данных для установления того, является ли организм вредным организмом (МСФМ 2, 2019). Анализ фитосанитарного риска оценивает вероятность интродукции и распространения вредного организма и величину потенциальных экономических последствий в определенной зоне с использованием биологических или других научных и экономических данных. Он может определить возможные варианты управления, которые могут уменьшить этот риск до приемлемого уровня. Кроме того, он может использоваться для установления фитосанитарных регламентаций. В анализе фитосанитарного риска также учитываются товары из определенного места происхождения и связанные с ними риски. Под эгидой Секретариата МККЗР была разработана серия стандартов по АФР<sup>3</sup> для использования странами в различных ситуациях.

Поскольку изменение климата оказывает влияние на биологию и эпидемиологию вредных организмов, необходимо активизировать деятельность в области АФР на национальном, региональном и международном уровнях, также необходимо включить аспекты изменения климата в оценку рисков для здоровья растений (Loripán, 2018). Интродукцию и распространение опасных инвазивных вредных организмов можно предотвратить только в том случае, если НОКЗР будут осведомлены о рисках, а такая осведомленность, прежде всего, возникает в результате АФР. В связи с этим важно позаботиться о том, чтобы влияние изменения климата было надлежащим образом отражено в методологии и процессе АФР. Это позволит экспертам по оценке риска правильно провести анализ рисков и предложить меры по смягчению последствий.

## Надзор и мониторинг

Одним из самых важных направлений деятельности НОКЗР является надзор и мониторинг вредных организмов, которые позволяют своевременно выявлять недавно интродуцированные вредные организмы и, следовательно, предпринимать незамедлительные действия по борьбе и ликвидации. Как правило, чем раньше после интродукции выявляется вредный организм, тем выше шансы успешного применения мер по его ликвидации. С учетом этого, надзор и мониторинг должны стать одним из основных элементов стратегии устранения опасности интродукции вредных организмов в условиях меняющегося климата (FAO, 2008) в целях обеспечения выявления интродукции новых вредных организмов. Поэтому неудивительно, что много документов, разрабатываемых под эгидой Секретариата МККЗР, посвящено надзору и выявлению, в том числе МСФМ (МСФМ 6, 2018) и руководство по надзору (IPPC Secretariat, 2016), наряду с серией диагностических протоколов по выявлению и идентификации вредителей и болезней.

Изменчивость климата, вызываемая изменением климата, окажет значительное влияние на структуру и реализацию соответствующих программ по надзору и мониторингу, осуществляемых официальными службами. В соответствии с МСФМ 6 (Надзор) одним из факторов, которые могут определять выбор зон и участков для проведения надзора, является пригодность для вредного организма климата и других экологических условий в зоне. Тем не менее, многое еще неизвестно о пригодности конкретных климатических условий для отдельных видов. До сих пор отсутствует четкое понимание влияния изменения климата на распределение видов. И в настоящее время обсуждается и изучается влияние изменения климата на микроклиматы и обитание в них виды. Хотя предполагается, что микроклиматы могут функционировать в качестве буферных зон, защищающих виды от исчезновения, создавая так называемую «микрорефугию» (Suggitt *et al.*, 2018), также признается, что

<sup>3</sup> Смотрите все утвержденные в рамках МККЗР Международные стандарты по фитосанитарным мерам по ссылке: <https://www.ippc.int/en/core-activities/standards-setting/ispm/>



знаний о влиянии изменения климата на микроклиматы и их экологию все еще недостаточно, и требуется больше исследований для более точной оценки будущих климатических условий, в которых организмы в микроклиматах будут существовать (Maclean, 2020). В будущих программах по надзору и мониторингу потребуется учитывать результаты таких исследований. Надзорные мероприятия, однако, могут не ограничиваться официальными обследованиями. Возможность использования «гражданской науки» для выявления новых угроз здоровью растений представляется многообещающим инструментом, который следует дополнительно изучить.

### Международное сотрудничество и обмен информацией

Изменение климата приведет к сдвигу агроклиматических зон (King *et al.*, 2018). В результате такого сдвига могут появиться новые торговые потоки, обеспечивающие сельскохозяйственными продуктами страны, которые больше всего страдают от их нехватки. В случаях, когда производство конкретных видов сельскохозяйственных культур сдвинется вследствие изменения климатических условий, торговые пути для этих видов также изменятся (Loripian, 2018). Вышеизложенная ситуация усугубляется прогнозом МГЭИК о том, что изменение климата приведет к увеличению объемов международной торговли сельскохозяйственными продуктами как в физическом, так и в стоимостном выражении (МГЭИК, 2014b).

Сдвиг зон сельскохозяйственного производства, изменение торговых потоков и обусловленное этим увеличение объемов международной торговли сельскохозяйственными продуктами приведет, наряду с ограниченным знанием поведения вредных организмов в новых климатических и экосистемных условиях, к дефициту надежной, научно доказуемой информации, на основании которой эксперты по оценке риска и регулирующие органы могли бы проводить оценку и принимать меры по смягчению последствий. Этот дефицит можно устранить посредством создания надежной международной сети обмена информацией, направленной на обеспечение официальных служб сведениями о присутствии вредных организмов и о потенциальных путях распространения. Однако, несмотря на то, что Секретариат МККЗР обладает полномочиями осуществлять обмен информацией, проводимая в этом направлении работа крайне ограничена и имеет скорее пассивный характер, выражающийся в публикации оповещений, предоставляемых договаривающимися сторонами. Многие еще предстоит сделать для активизации международного обмена информацией.

### Профилактические методы борьбы с вредными организмами

Оптимально доступные методы борьбы с вредными организмами включают, например, производство чистого семенного и посадочного материала, системы раннего предупреждения, хорошие средства диагностики и эффективные обработки, в частности, дражирование семенного материала (Gullino, Gullardi and Garibaldi, 2014b; Gullino and Munkvold, 2014; Munkvold, 2009; Munkvold and Gullino, 2020; Thomas *et al.*, 2017), наряду с соответствующим отбором образцов и мониторингом. К другим оптимально доступным методам относится использование устойчивых культиваров при их наличии, внедрение агротехнических приемов, обеспечивающих здоровье растений, системы интегрированной защиты растений, применение строгих санитарно-гигиенических мер, а также использование биологических средств защиты сельскохозяйственных культур. Эти методы приобретут еще большую важность перед лицом возрастающих и меняющихся вследствие изменения климата фитосанитарных угроз, и для сохранения их эффективности, вероятно, потребуется внесение некоторых корректив: например, в севооборот могут быть включены более приспособленные к местным климатическим условиям виды, также может потребоваться активизация режимов применения фунгицидов (см. таблицу 4).

**Таблица 4** Примеры некоторых предположений о потенциальном воздействии меняющегося состава атмосферы и климата на выбранные стратегии или методы борьбы с болезнями растений

СТРАТЕГИЯ БОРЬБЫ	МЕТОД	ОЖИДАЕМОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА	ПОТЕНЦИАЛ МЕТОДА В ЧАСТИ АДАПТАЦИИ
Недопущение	Барьер против проникновения (карантин)	Обусловленное климатом изменение в распространении патогенов – частота, численность, расстояние, скорость	Вероятно изменение эффективности карантинной практики. Потребуется новые фитосанитарные меры, включая использование международных (МККЗР) стандартных обработок.
Профилактика	Севооборот	Никакого прямого воздействия; разнообразие систем земледелия сохранит свою значимость в снижении риска возникновения болезней.	Возможно, потребуются виды сельскохозяйственных культур, более приспособленные к местным климатическим условиям.
Профилактика	Утилизация растительных остатков	Потенциальное увеличение биомассы урожая благодаря удобряющему эффекту CO <sub>2</sub> , если только высокая температура и засуха не нейтрализуют этот удобряющий эффект.	Необходимы инновационные подходы для сокращения количества инокулята и сапрофитной колонизации.
Профилактика	Сроки посева или посадки	Возможно, потребуются корректировка; простой и недорогой метод недопущения биотического и абиотического стресса; однако также могут быть недостатки.	По всей видимости, это эффективное средство (часто упоминается в литературных источниках).
Профилактика	Устойчивость растений-хозяев	Патогены могут преодолеть зависящую от температуры устойчивость; изменения морфологии и физиологии растений может отразиться на устойчивости; потенциальное ускорение эволюции патогена может преждевременно разрушить устойчивость к болезням.	Вероятно изменение эффективности устойчивости растений-хозяев (эффективность выше, на том же уровне или ниже в зависимости от гена устойчивости (R), популяции патогена и т.д.).
Профилактика	Очистка техники и инструментов	Предположительно, никакого серьезного воздействия.	Фитосанитарные методы сохраняют свою важность.
Профилактика	Использование здоровых семян и саженцев	Предположительно, никакого серьезного воздействия.	Профилактические методы сохраняют свою важность.
Профилактика	Количество используемых ресурсов (например, интенсивность полива)	Предположительно, высокие температуры приведут к увеличению интенсивности орошения большего количества культур и в большем числе регионов.	В сфере управления водными ресурсами может потребоваться использование эффективных технологий, например, капельного орошения, благодаря которым сократится риск возникновения болезней листьев.
Профилактика или оздоровление	Полевой мониторинг и использование систем поддержки принятия решений	Предположительно, никакого серьезного воздействия.	Полевой мониторинг и системы поддержки принятия решений сохраняют или приобретут еще большую важность.
Профилактика или оздоровление	Соляризация почвы (почва укрывается, как правило, пленкой для поглощения солнечной энергии в целях снижения количества вредных организмов в почве)	Глобальное потепление может упростить использование этого метода (он может быть эффективен в более фитопатогенных системах и регионах, высокая температура может достичь более глубоких слоев почвы, а длительность периода мульчирования может сократиться).	Вероятно изменение эффективности, но, в целом, положительное воздействие.
Профилактика или оздоровление	Антагонисты, агенты биологической борьбы	Предположительно, возрастет уязвимость агентов биологической борьбы из-за изменчивости климата.	Вероятно изменение эффективности (эффективность выше, на том же уровне или ниже в зависимости от средства, окружающей среды, организации процесса и т.д.).
Профилактика или оздоровление	Контактные фунгициды	При более частом выпадении осадков может потребоваться больше обработок; более быстрый или медленный рост культуры может сократить или удлинить периоды времени между применением фунгицидов.	Вероятно изменение эффективности (эффективность выше, на том же уровне или ниже в зависимости от средства, окружающей среды, организации процесса и т.д.).
Профилактика или оздоровление	Системные фунгициды	Для достоверного прогноза необходимо получить больше знаний о процессе поглощения листьями системных фунгицидов. Тем не менее, возможно снижение эффективности фунгицидов с ростом температур просто по той причине, что рост патогенов будет более активным.	Вероятно изменение эффективности (эффективность выше, на том же уровне или ниже в зависимости от средства, окружающей среды, организации процесса и т.д.).

Источник: Переработано по материалам Juroszek and von Tiedemann (2011).



## Последние технические достижения

Ниже в качестве примера внедрения новых технологий в сферу защиты растений приводится одно многообещающее прогрессивное направление – использование нанотехнологий. Нанотехнологии дают возможность создать инновационные и усовершенствованные продукты защиты сельскохозяйственных культур, которые позволяют противодействовать возрастающему фитосанитарному риску, в том числе, вызванному изменением климата. Они еще находятся в состоянии разработки и пока не имеют широкого применения на практике. Кроме того, они могут быть труднодоступны в странах с низким уровнем доходов, по крайней мере, в первое время, в силу экономических причин. Однако демонстрируется то, что потенциально возможно. Совершенствование таких методов крайне важно, а в будущем приобретет решающее значение.

### Наноудобрения и пестициды

За последние два десятилетия достижения в области нанонауки породили новый интерес к применению и последствиям использования нанотехнологий в сфере устойчивого сельского хозяйства, а также инициировали исследования в этой области (Scott, Chen and Cui, 2018). Помимо основополагающего использования наноудобрений в точном земледелии (Raliya *et al.*, 2018) было высказано предположение, что нанотехнологии потенциально могут увеличить эффективность и безопасность пестицидов. Пестициды, произведенные с использованием нанотехнологий, будут иметь большую площадь поверхности и смогут обеспечивать высокоточную доставку в ответ на такие инициирующие факторы окружающей среды, как температура, уровень pH, влажность, энзимы и свет (Bingna *et al.*, 2018), они также будут обладать растворимостью в воде, тем самым сводя к минимуму остаточное содержание в окружающей среде (Zhao *et al.*, 2018). Первые эксперименты с твердыми наночастицами, состоящими из оксидов металлов, серы и кремния, подтвердили возможность их успешного применения для борьбы с рядом вредных организмов (Goswami *et al.*, 2010).

В последнее время применение нанотехнологий в сфере сельского хозяйства, как правило, заключается в инкапсуляции известных гербицидов, фунгицидов или инсектицидов в синтетические наночастицы из глины, кремния, лигнина или природных полимеров, включая альгинат, хитозан и этилцеллюлозу (Diyana *et al.*, 2019). Поликапролактон используется в качестве наночастицы для гербицида претилахлор (Diyana *et al.*, 2019), гербицидов триазинового ряда – атразина, аметрина и симазина (Grillo *et al.*, 2012), а также для пестицида авермектин (Su *et al.*, 2020). Поликапролактон приобрел популярность, поскольку он естественным образом разлагается в окружающей среде, его производство стоит недорого и не зависит от производства пластика из нефти (Sabry and Ragaei, 2018).

Прошло весьма успешное испытание нанопестицидов в борьбе с сосновой стволовой нематодой, в ходе которых наноинкапсулированный авермектин продемонстрировал превосходное токсическое воздействие на пищеварительную систему нематоды, пролонгированное высвобождение и улучшенную фотолитическую стабильность по сравнению с традиционной доставкой авермектина (Su *et al.*, 2020). Также было выявлено уменьшение вредного воздействия наноинкапсулированного атразина на окружающую среду, при этом показатели гибели проростков *Bidens pilosa* остались на прежнем уровне (Preisler *et al.*, 2020). В этом исследовании наноинкапсулированный атразин при использовании в объеме 200 г/га оказывал такое же ингибирующее воздействие, что и неинкапсулированный гербицид при использовании 2 000 г/га, что представляет десятикратное уменьшение концентрации гербицида. Также в случае с растениями горчицы атразин, инкапсулированный в поликапролактон, при десятикратном разведении имел такую же эффективность, что и неразведенный, неинкапсулированный атразин (Oliveira *et al.*, 2015).

### Углубленная селекция с целью формирования устойчивости

Еще одна возможность применения нанотехнологий в сельском хозяйстве – это их использование в качестве метода доставки для переноса ДНК растений с целью активизации устойчивости к вредным организмам (Rai and Ingle, 2012; Sabry and Ragaеi, 2018), что позволяет сократить использование потенциально опасных для окружающей среды химических пестицидов. В качестве одного из методов генной инженерии растений было предложено использовать наночастицы в целях пассивной доставки «грузов» на основе нуклеаз для редактирования генома. Этот метод позволит преодолеть сложности существующих методов переноса генов (например, генная пушка и ультразвук), связанные с физическим барьером многослойной и неэластичной стенки растительной клетки, из-за чего генная инженерия растений отстает от генной инженерии животных (Cunningham *et al.*, 2018). Некоторые методы доставки ДНК в клетки животных можно адаптировать для растений в контролируемых условиях (Chang *et al.*, 2013; Torney *et al.*, 2007).

### Система обмена информацией

В дополнение к разработке современных технологий, описанных выше, также существуют инициативы по содействию обмену данными и информацией. В рамках инициативы «MyPestGuide» в Австралии, например, на общей цифровой платформе размещены оповещения о сорняках, справочники по идентификации вредных организмов, а также инструменты в области управления принятием решений (Wright *et al.*, 2018). Глобальная система обмена данными может содействовать решению проблем, связанных с вредными организмами, которые быстро распространяются и потенциально могут нанести значительный ущерб (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019).



## Смягчение последствий и адаптация

За редким исключением (например, Gouache *et al.*, 2011) имитационное моделирование фитосанитарных рисков не включало меры, которые фермеры и производители могли бы принимать для смягчения последствий или адаптации к увеличению фитосанитарного риска в будущем. Это касается как сельского (Juroszek and von Tiedemann, 2015), так и лесного хозяйства (Bentz and Jönsson, 2015). Тем не менее, в сельском хозяйстве существует ряд потенциальных краткосрочных вариантов смягчения последствий и адаптации, и их необходимо не только учитывать фермерам и производителям, но и включать в имитационные модели в целях обеспечения поддержки принятия решений в будущем. Дальнейшая разработка инструментов, необходимых для адаптивных мер борьбы с вредными организмами, увеличит вероятность успешного применения стратегий адаптации в будущем (Macfayden, McDonald and Hill, 2018).

Повышение устойчивости растений-хозяев (и большей конкурентоспособности сельскохозяйственных культур по сравнению с сорняками) и корректировка применения пестицидов рассматриваются большинством ученых в качестве двух наиболее эффективных способов адаптации защиты сельскохозяйственных культур к будущим климатическим условиям (рассмотрено в работе Juroszek and von Tiedemann, 2015). Другие способы включают в себя корректировку времени посева, севооборот с более продолжительной ротацией культур, повышение качества фитосанитарного прогноза, корректировку агротехнических практик, таких как орошение и внесение удобрений, а также предоставление адресной консультативной помощи (Juroszek and von Tiedemann, 2015). Нельзя не отметить, что несколько потенциальных инструментов адаптации в сфере защиты растений, в частности, изменение микроклимата путем изменения плотности посевов, вообще не обсуждается в литературе, связанной с имитационным моделированием фитосанитарных рисков.

В лесном и сельском хозяйстве также может возникнуть необходимость внедрения климатически оптимизированных стратегий (Heeb, Jenner and Cook, 2019; Lipper *et al.*, 2014). В целом, интегрированная защита растений включает в себя широкий ряд непосредственных и опосредованных мер защиты здоровья растений (Heeb, Jenner and Cook, 2019; Juroszek and von Tiedemann, 2011). К ним относятся карантин (биозащита), другие фитосанитарные меры (например, здоровые семена и саженцы), тщательный мониторинг и оптимальное планирование сроков принятия необходимых мер воздействия (Heeb, Jenner and Cook, 2019; Strand, 2000) или биологической борьбы (Eigenbrode, Davis and Crowder, 2015).

В разрезе адаптации систем земледелия к изменению климата одним из наиболее привлекательных вариантов является селекция с целью формирования устойчивости к болезням (Miedaner and Juroszek, 2021a, 2021b). Сорты с устойчивостью к засухе, высоким температурам и вредным организмам крайне важны для обеспечения продовольственной безопасности в части основных культур, таких как кукуруза и бобовые, а также коммерческих культур, предназначенных для экспорта, таких как кофе и соевые бобы. Иногда новые сорта позволяют корректировать сельскохозяйственные системы в целях ограничения фитосанитарного риска, связанного с вероятными изменениями. Например, наличие новых сортов пшеницы в центральной части Квинсленда (Австралия) для посева на три – четыре недели раньше (Howden, Gifford and Meinke, 2010). Также и в случае с какао при разработке новых сортов в условиях изменения климата предлагается осуществлять селекцию на основе множества критериев (Cilas and Bastide, 2020). Несмотря на то, что селекция сельскохозяйственных культур и, в особенности, селекция деревьев значительно запаздывает в реагировании на новые проблемы, модели воздействия изменения климата на фитосанитарный риск могут способствовать выработке надлежащих стратегий по упреждению новых проблем. Определение, сохранение и использование древних сортов также может оказаться полезным.

В лесном хозяйстве адаптивные меры реагирования на потенциальное воздействие изменения климата с большой долей вероятности будут сопряжены с профилактическими мерами, такими как удаление зараженных деревьев в целях недопущения дальнейшего распространения вредных организмов, учитывая сложность эффективного ухода за высокими взрослыми деревьями (Bonello *et al.*, 2020; Liebhold and Kean, 2019). Еще одним важным вариантом профилактической адаптации является использование генетического разнообразия – при посадке новых лесов выбор подходящих видов деревьев либо устойчивых или толерантных к вредным организмам клонов или культиваров, при их наличии (Bonello *et al.*, 2020).

Выбор стратегий адаптации будет зависеть от множества факторов. Один из факторов – это стоимость, при этом в работе Srivastava, Kumar and Aggarwal (2010) делается вывод, что для уменьшения уязвимости растениеводства к изменению климата следует рассматривать более малозатратные стратегии адаптации, в частности, изменение даты посева и выбор культивара. Целесообразность изменения сроков посадки или сбора урожая все же зависит от потенциальной потери урожая и от места выращивания сельскохозяйственной культуры, предпочтений, которые фермеры и потребители отдают тому или иному культивару, а также ситуации на рынке (Wolfe *et al.*, 2008). Также может возникнуть необходимость в более дорогостоящих способах адаптации (Juroszek and von Tiedemann, 2011). Они могут заключаться в разработке более эффективных методов борьбы с патогенами в пожнивных остатках, которые можно сочетать с такими хорошо зарекомендовавшими себя методами, как севооборот, с целью недопущения образования на пожнивных остатках сапрофитных колоний патогенов и для сокращения переноса инокулята из одного сельскохозяйственного сезона в другой (Melloy *et al.*, 2010). «Старомодные» методы, в частности, распахивание земли, также представляют собой эффективный метод обезвреживания заболевших пожнивных остатков (Miedaner and Juroszek, 2021b), хотя для подверженных засухе районов, возможно, больше подходит почвозащитное земледелие. Кроме того, по сравнению с минимальной обработкой почвы при плужной обработке используется больше топлива, что приводит к влияющим на климат выбросам CO<sub>2</sub>.

И, наконец, при стратегическом планировании важно решить, где будут выращиваться многолетние сельскохозяйственные культуры, такие как финиковые пальмы (Shabani and Kumar, 2013). Знания о том, где в будущем, возможно, появятся болезни таких культур, которые способны нанести экономический ущерб, могут помочь определить места с низким уровнем риска в целях недопущения или сведения к минимуму будущего воздействия этих болезней (Shabani and Kumar, 2013). Это также относится к лесному хозяйству, где планирование имеет особенно важное значение в целях недопущения или минимизации возрастающих фитосанитарных рисков в будущем, как объясняется выше. В отношении однолетних культур, таких как масличный рапс, в качестве одной из мер адаптации в условиях худшего сценария был предложен перенос зон выращивания (Butterworth *et al.*, 2010). И действительно, в Египте производство конских бобов было перенесено из центральной части в более прохладную область дельты Нила на севере в целях предотвращения губительного воздействия вирусной болезни, вероятной причиной которой, по крайней мере отчасти, является глобальное потепление.

Все вышеописанные способы могут сыграть определенную роль в создании возможностей для фермеров и производителей смягчать последствия и адаптироваться к возрастающему фитосанитарному риску. В целом, однако, будет важно отдавать предпочтение технологиям и методам, которые одновременно могут способствовать повышению производительности и сокращению уязвимости по отношению к изменениям, вызываемым влияющими на климат выбросами, в том числе CO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> и CH<sub>4</sub>, и применять такие технологии и методы на практике.



# Выводы и рекомендации





**В** последние десятилетия наблюдается стремительный рост объемов исследований в области влияния изменения климата на биологические процессы с ежегодными многочисленными публикациями, особенно в течение последних десяти лет (e.g. Björkman and Niemelä, 2015; Juroszek *et al.*, 2020; Peterson, Menon and Li, 2010). Большая часть исследований (обобщенно приведенных в таблице 5) указывает на то, что, в целом, фитосанитарный риск, представляемый насекомыми, патогенами и сорными растениями, увеличится в сельскохозяйственных экосистемах в условиях изменения климата (Choudhary, Kumari and Fand, 2019; Clements, DiTommaso and Hyyönen, 2014; Juroszek *et al.*, 2020), особенно в современных более прохладных арктических, северных, умеренных и субтропических регионах. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что изменения коснутся всех типов климата, однако характер и степень воздействия будут различаться в зависимости от способности систем сельскохозяйственного производства и естественных экосистем адаптироваться и эволюционировать. Также это во многом относится к патогенам и насекомым-вредителям в лесном хозяйстве (Seidl *et al.*, 2017).

Климатически оптимизированные стратегии борьбы с вредными организмами были недавно описаны в работе Heeb, Jenner and Cook (2019). Эти и другие профилактические и оздоровительные меры защиты растений понадобятся странам для адаптации к новым климатическим условиям (Almekinders *et al.*, 2019; Erikson and Griffin, 2014; Thomas-Sharma *et al.*, 2016). Однако также необходимо принять во внимание вопросы нормативно-правового регулирования, потребности в научных исследованиях, международное сотрудничество и наращивание потенциала. Рекомендации по этим трем аспектам приводятся в данном разделе доклада.

## **Вопросы разработки политики и нормативно-правового регулирования**

### **Корректировка анализа фитосанитарного риска в части изменения климата**

Анализ фитосанитарного риска представляет собой научное обоснование всех фитосанитарных мер, в том числе мер, разработанных под эгидой Секретариата МККЗР. Предлагается провести оценку МСФМ, касающихся АФР, в части возможности их применения в отношении связанных с изменением климата вопросов. Необходимо активизировать деятельность в области АФР на национальном, региональном и международном уровнях, также необходимо включить аспекты изменения климата в оценку фитосанитарного риска.

### **Надзор и мониторинг, относящиеся к изменению климата**

Надзор и мониторинг – важные инструменты выявления интродукции новых вредных организмов или мониторинга их статуса. Предлагается провести оценку МСФМ и руководств по этим темам, разработанных под эгидой Секретариата МККЗР, на предмет необходимости их пересмотра с целью учета влияния изменения климата. Необходимо активизировать национальную, региональную и международную деятельность в области надзора и мониторинга угроз здоровью растений. Предлагается рассмотреть возможность создания типовых образцов многосторонних программ по надзору, особенно для развивающихся стран, в целях демонстрации возможностей применения таких программ для противодействия фитосанитарным угрозам.

### **Активный обмен информацией и оповещение**

Международный обмен информацией о торговых потоках, распространении вредных организмов и выявлении вредных организмов имеет чрезвычайно



важное значение для компенсации нехватки информации, полученной в результате научных исследований, в отношении влияния изменения климата на здоровье растений. Также крайне важно обмениваться информацией об изменениях распространенности, спектра растений-хозяев и приспособляемости вредных организмов. Важно расширить систему МККЗР по оповещению, которая сочетает в себе официальные оповещения договаривающихся сторон с другой доступной и опубликованной информацией.

## Необходимые исследования

Заметные пробелы в научных исследованиях, связанных с изменением климата и вредными организмами, приведены в таблице 6. Финансирующим органам и организациям, проводящим исследования, необходимо рассмотреть включение этих неизученных тем, по мере возможности, в свои программы исследований. В частности, в большинстве географических зон необходимо уделять больше внимания поддержке всеобъемлющих и междисциплинарных программ научных исследований. Программы научных исследований должны охватывать потребности промышленно развитых, а также развивающихся стран. Потребуется долгосрочное финансирование для того, чтобы установить влияние текущего и будущего изменения климата в долгосрочной перспективе и связанных с ним фитосанитарных рисков, включая методы испытаний, направленные на минимизацию рисков. В связи с этим следует выбрать несколько «горячих точек» (зон производства, чувствительных к климату) для осуществления долгосрочных исследований и деятельности по развитию («Демонстрационные площадки по изменению климата для проведения анализа фитосанитарного риска и испытания методов снижения фитосанитарного риска» – ДПИК-АФР-МСФР).

Кроме того, правительствам стран необходимо направить финансирование на укрепление национальных систем и структур в сфере надзора, в частности, диагностических лабораторий, в целях обеспечения способности оперативного противодействия возможным биологическим вторжениям. Кроме того, должны быть созданы эффективно работающие подразделения по АФР для того, чтобы иметь возможность предотвращать такие вторжения.

Ниже приведены некоторые специфические вопросы, требующие проведения научных исследований.

### Исследования по влиянию изменения климата на средства и стратегии защиты растений

Существует много пробелов в научных исследованиях, которые необходимо заполнить в этой области. Например, существует вероятность приобретения вредными организмами устойчивости к средствам защиты растений, если такие средства будут чаще использоваться в ответ на увеличение численности вредных организмов из-за изменения климата. Однако для изучения этого вопроса необходимо провести исследования. Более того, до настоящего времени остается недостаточно изученным непосредственное влияние изменения климата на эффективность применяемых стратегий защиты, особенно, мер химической или биологической борьбы (Gilardi *et al.*, 2017, Gullino *et al.*, 2020), и этот вопрос необходимо более обстоятельно изучить (таблица 6). Уже имеются результаты нескольких экспериментов, которые демонстрируют, например, что глобальное потепление может увеличить риск распространения устойчивых к гербицидам сорняков ввиду усиления зависящей от температуры детоксикации гербицида сорным растением (Matzrafi *et al.*, 2016). Также необходимо проводить исследования вредных организмов, обитающих под землей, поскольку в большинстве исследований, посвященных потенциальному воздействию изменения климата на вредные организмы, непропорционально много внимания уделяется вредным организмам, которые обитают над уровнем поверхности земли, а не под землей, несмотря на то, что последние оказывают важное воздействие на протекающие под землей процессы и влияют на здоровье почвы (Chakraborty, Pangga and Roper, 2012; Pritchard, 2011).

**Таблица 5** Примеры недавно опубликованных обзорных статей, посвященных изменению климата и будущему фитосанитарному риску для растительных экосистем в сельском хозяйстве, садоводстве, лесном хозяйстве и в неуправляемых естественных средах обитания

ГРУППА ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ	БИБЛИОГРАФИЯ (В ХРОНОЛОГИЧЕСКОМ ПОРЯДКЕ ПО КАЖДОЙ ГРУППЕ)
Насекомые	Choudhary, Kumari and Fand, 2019; Jactel, Koricheva and Castagneyrol, 2019; Kellermann and van Heerwaarden, 2019; Moriyama and Numata, 2019; Yadav, Stow and Dudaniec, 2019; Borkataki <i>et al.</i> , 2020; Debelo, 2020; Frank, 2020; Lehmann <i>et al.</i> , 2020; Marshall, Gotthard and Williams, 2020.
Возбудители болезней	Paraschivu <i>et al.</i> , 2019; Paterson and Lima, 2019; Sharma, Hooda and Goswami, 2019; Singh, Shukla and Singh, 2019; Castillo <i>et al.</i> , 2020; Garrett <i>et al.</i> (2020a); Hunjan and Lore, 2020; Juroszek <i>et al.</i> 2020; Kumar and Khurana, 2020; Mehmood <i>et al.</i> , 2020; Misra <i>et al.</i> , 2020; Perrone <i>et al.</i> , 2020; Priyanka <i>et al.</i> , 2020; Roth <i>et al.</i> , 2020; Trebicki, 2020.
Сорные растения	Billore, 2019; Manisankar and Ramesh, 2019; Ziska, Blumenthal and Franks, 2019; Karaca and Dursun, 2020; Ruttledge and Chauhan, 2020; Sun <i>et al.</i> , 2020.
Сочетания групп вредных организмов	Heeb, Jenner and Cock, 2019; Santini and Battisti, 2019; Trebicki and Finlay, 2019; Bajwa <i>et al.</i> , 2020; Bonello <i>et al.</i> , 2020; Jabran, Florentine and Chauhan, 2020; Jactel <i>et al.</i> , 2020.

**Примечания:** Приведенные примеры были выбраны на субъективной основе, предпочтение отдавалось публикациям с 2019 года до сентября 2020 года в журналах и книгах, и они включают в себя мини-обзоры. Обзорные статьи по этой же теме, опубликованные в 1988 – 2011 гг., приводятся в работе Juroszek and von Tiedemann (2013a).

**Таблица 6** Примеры пробелов в научных исследованиях, связанных с изменением климата и вредными организмами

ПРОБЕЛ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ)	ИЗБРАННАЯ БИБЛИОГРАФИЯ
Менее изучены потенциальные возможности, связанные с защитой сельскохозяйственных культур	Sutherst <i>et al.</i> , 2007.
Менее изучены обитающие под землей виды по сравнению с видами, обитающими над уровнем поверхности земли	Pritchard, 2011.
Менее изучены тропические виды по сравнению с видами, обитающими в регионах с субтропическим и умеренным климатом	Ghini, Bettiol and Hamada, 2011.
Менее изучены вредные организмы в неуправляемых системах по сравнению с вредными организмами в управляемых системах	Anderson <i>et al.</i> , 2004.
Исследования сводятся к нескольким видам особо опасных вредных организмов; многие другие вредные организмы менее изучены либо совсем не изучены (например, бактерии и вирусы изучены значительно меньше, чем обитающие над уровнем поверхности земли патогенные грибы)	Frank, 2020; Jones, 2016.
Необходимо провести значительно больше многофакторных полевых экспериментов, в которых учитываются взаимодействия температуры, воды и CO <sub>2</sub> (имитационное моделирование будущих реальных условий, например, с использованием методов обогащения атмосферного воздуха углекислым газом)	Tenllado and Canto, 2020; Vilà <i>et al.</i> , 2021.
Плохо изучены биотические взаимодействия между трофическими уровнями, включая адаптационный потенциал видов	Van der Putten, Macel and Visser, 2010.
Необходим всесторонний обзор прошлых результатов в сфере сельского хозяйства и садоводства	Juroszek <i>et al.</i> , 2020.
Необходимо провести оценку существующих методов защиты растений в условиях изменения климата	Delcour, Spanoghe and Uyttendaele, 2015.
Требуются совокупности данных многолетних наблюдений для дифференциации потенциального воздействия изменения климата на вредителей и болезни со стороны смешанных факторов, таких как изменения методов борьбы	Garrett <i>et al.</i> , 2016, 2021.
Имитационное моделирование будущего фитосанитарного риска необходимо чаще привязывать к моделям по сельскохозяйственным культурам в целях прогноза потенциальных потерь урожая; также, по возможности, в процессе моделирования необходимо учитывать потенциальные меры по адаптации и смягчению последствий	Juroszek and von Tiedemann, 2015.
Требуется значительно больше исследований в сфере адаптации и смягчения последствий в целях сведения к минимуму возрастающих рисков	Hoffmann <i>et al.</i> , 2019.
Требуются рамочные программы для адаптации систем поддержки принятия решений к новому частотному распределению погодных условий и даже к абсолютно новым сценариям	Garrett <i>et al.</i> , 2020a.

**Примечания:** Приведенные примеры были выбраны на субъективной основе; однако предпочтение отдавалось публикациям после 2010 года в целях иллюстрации того, что пробелы в исследованиях все еще существуют. В целом, каждый пример в равной степени применим к насекомым-вредителям, возбудителям болезней и сорным растениям. Переработано по материалам Juroszek and von Tiedemann (2013a) и Juroszek *et al.* (2020).

## Исследование влияния изменения климата на естественных врагов

Еще предстоит осмыслить влияние изменения климата на естественных врагов и антагонистов со всеми вытекающими последствиями для борьбы с вредными организмами (Eigenbrode, Davis and Crowder, 2015). В отношении борьбы с насекомыми-вредителями винограда было высказано предположение, что в будущем она должна основываться на массиве убедительных данных полевых исследований, полученных в условиях изменения климата как по вредителям, так и по антагонистам (Reineke and Thiéry, 2016). Более глубокое понимание влияния изменения климата на экологические процессы, в том числе на уровне общин, позволит внедрить общие принципы в практику защиты растений (Macfayden, McDonald and Hill, 2018).

## Лесное хозяйство и неуправляемые экосистемы

Изучению вредных организмов в сельском хозяйстве уделяется гораздо больше внимания, чем в лесном хозяйстве (Ormsby and Brenton-Rule, 2017), и редко проводятся исследования, связанные с неуправляемыми экосистемами (Harvell *et al.*, 2002). Это указывает на необходимость междисциплинарного сотрудничества, согласованности и обмена знаниями в области исследований биологических процессов, вызванных изменением климата, с целью объединения ученых, работающих над различными биотомами в рамках одной экосистемы, например, фитопатологов и энтомологов (Jactel *et al.*, 2020) со специалистами, работающими над разными экосистемами и в разных секторах, таких как сельское хозяйство, лесное хозяйство и неуправляемые экосистемы (например, подходы «Здоровье в круговой системе» или «Единое здоровье»).

## Международное сотрудничество

Международное сотрудничество играет критически важную роль в успешной адаптации странами своих стратегий борьбы с вредными организмами к изменению климата. Это связано с тем, что эффективная борьба, осуществляемая одним фермером или одной страной, влияет на успех других, поскольку вредные организмы не признают границ. Международное сотрудничество может быть глобальным или региональным. Предлагаемая новая система надзора за болезнями сельскохозяйственных культур, к примеру, будет интегрирована в различные диагностические сети, сети управления данными, сети по оценке рисков, а также сети передачи данных (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019).

Создание механизма глобальной координации фитосанитарных исследований, как предлагается в Стратегической рамочной программе МККЗР на 2020-2030 гг. (FAO, 2021b), может расширить научное сотрудничество, усилить координацию работы, оптимизировать использование ресурсов и способствовать согласованию целей. Таким образом, содействие может быть оказано не только развитию науки, но и укреплению научного фундамента международных усилий по оценке влияния изменения климата на состояние здоровья растений и смягчению его последствий, что будет способствовать защите сельского хозяйства, окружающей среды и торговли от вредных организмов.

На региональном уровне анализ сценариев потенциальной реакции на изменение климата может помочь обосновать стратегии по адаптации региональной борьбы с болезнями (Garrett *et al.*, 2018). Однако несмотря на то, что многие национальные и региональные организации по карантину и защите растений проводят работу по мониторингу и локализации очагов вредных для сельскохозяйственных культур организмов, многие страны не обеспечивают эффективного обмена информацией, что вызывает задержку согласованного реагирования, направленного на предотвращение акклиматизации и распространения болезней. По этой причине принципиально важным элементом международного сотрудничества в этих странах должно стать содействие развитию потенциала. При поддержке международных организаций глобальные форумы по обмену информацией могли бы сыграть весьма полезную роль. Недавно приобретенный опыт организации совещаний в режиме онлайн во

время пандемии COVID-19 поможет развитию контактов и взаимодействия на больших расстояниях со значительной экономией времени и денег.

## Наращивание потенциала

Наряду с тем, что пандемия COVID-19 нарушила функционирование большей части аспектов нашей жизни, в том числе продовольственных и образовательных систем, она также продемонстрировала возможность новых совместных программ по наращиванию потенциала, поскольку обучение переместилось в Интернет. Устранение неравного доступа в Интернет поможет поддержать эти новые возможности наращивания потенциала в режиме онлайн.

Существуют различные способы, при помощи которых страны могут наращивать свой потенциал для противодействия изменению климата и адаптации к нему. Следующие примеры служат иллюстрацией некоторых таких возможностей.

Консультативная группа по международным сельскохозяйственным исследованиям (КГМСХИ), представляющая собой глобальное партнерство в интересах научных исследований в области продовольственной безопасности, начиная с 2022 года создает новую «Единую КГМСХИ» с целью внедрения научных инноваций в продовольственные, земельные и водные системы быстрее, в большем масштабе и с меньшими расходами. Может оказаться целесообразным сохранить борьбу с вредными организмами в качестве ключевого элемента новой стратегии «Единой КГМСХИ» в целях укрепления адаптивного потенциала на глобальном уровне и, особенно, в странах, которые все еще наращивают свой потенциал для решения этих проблем. К их числу могут относиться «бесприигрышные» подходы к адаптации, в частности, общее укрепление систем и их способности реагировать на новые проблемы, обусловленные изменением климата (Heltberg, Siegel and Jorgensen, 2009). Идея, лежащая в основе такого типа подходов, заключается в том, что пользу принесут многие усовершенствования системы вне зависимости от того, реализуются или нет конкретные текущие сценарии изменения климата. Поскольку интродукция новых вредных организмов зачастую оказывает, по меньшей мере, такое же влияние, что и последствия изменения климата, не вызывает затруднений запланировать неприигрышное усовершенствование системы борьбы с вредными организмами. У неприигрышных вариантов могут иметься ограничения (Dilling *et al.*, 2015), однако существует много возможностей для улучшения систем борьбы с вредителями и болезнями в фермерских хозяйствах и на региональном уровне. Оценка фитосанитарного потенциала, разработанная Секретариатом МККЗР, может использоваться для оценки готовности страны реагировать на проблемы, связанные с болезнями растений (Day, Quinlan and Ogutu, 2006; IPPC Secretariat, 2012). Это еще один пример потенциального неприигрышного подхода, поскольку расширение потенциала принесет пользу вне зависимости от того, реализуются или нет конкретные текущие сценарии изменения климата так, как ожидалось, кроме того, расширение потенциала, вероятно, приведет к повышению эффективности затрат.

Наращивание потенциала в целях адаптации к изменениям также означает поиск путей управления финансовым риском. Иногда этого можно достичь, по крайней мере отчасти, посредством страхования сельскохозяйственных культур, что является интересным способом защиты средств к существованию фермеров в условиях стрессов, вызываемых изменением климата. Однако при этом необязательно будет защищена эффективность сельскохозяйственного производства, и, возможно, это станет стимулом для дальнейшего выращивания определенных культур в регионах, где сельскохозяйственные культуры уже не подходят для новых условий окружающей среды (Falco *et al.*, 2014).

Элементы эффективного альтруизма («приносить пользу обществу»), согласно которому можно посвятить некоторую часть усилий оценке наихудших сценариев воздействия вредных организмов и способам противостояния этому, также могут оказаться полезными при содействии странам в адаптации к изменению климата (Garrett *et al.*, 2020b).

**В** заключение следует отметить, что по данным, проанализированным в настоящем докладе, во многих случаях изменение климата приведет к увеличению проблем, связанных с состоянием здоровья растений в управляемых (например, сельское хозяйство, садоводство, лесное хозяйство), полууправляемых (например, национальные парки), а также, предположительно, в неуправляемых экосистемах. Уже сегодня из-за текущих изменений климата необходимо вносить коррективы в стратегии защиты растений, а в будущем корректировка будет играть еще более важную роль, если допустить, что сбудутся прогнозируемые сценарии изменения климата. Климатически оптимизированная борьба с вредными организмами, предполагающая применение комплексных подходов во всех фермерских хозяйствах и ландшафтных зонах, главным образом, основана на выбранных существующих методах борьбы для обеспечения возможности повысить эффективность смягчения последствий и укрепления устойчивости. Поддержание услуг и производства в управляемых и неуправляемых экосистемах, в том числе производства продовольствия, в условиях изменения климата имеет первостепенную важность, а профилактические и оздоровительные меры защиты растений являются ключевыми элементами обеспечения текущей и будущей продовольственной безопасности.

# Библиография

- Abd-Elgawad, M.M.M.** 2020. Managing nematodes in Egyptian citrus orchards. *Bulletin of the National Research Centre*, 44: 41 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00298-9>
- Ainsworth, E.A. & Long, S.P.** 2021. 30 years of free-air carbon enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology*, 27: 27–49.
- Al-Ayedh, H.Y. Al-** 2017. The current state of the art research and technologies on RPW management. Paper presented at the “Scientific Consultation and High-Level Meeting on Red Palm Weevil Management”, 29–31 March 2017, Rome, FAO.
- Albajes, R., Gullino, M.L., van Lenteren, J.C. & Elad, Y., eds.** 1999. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Almeida, R.P.P., Blua, M.J., Lopes, J.R.S. & Purcell, A.H.** 2005. Vector transmission of *Xylella fastidiosa*: Applying fundamental knowledge to generate disease management strategies. *Annals of the Entomological Society of America*, 98: 775–786.
- Almekinders, C.J., Walsh, S., Jacobsen, K.S., Andrade-Piedra, J.L., McEwan, M.A., de Haan, S., Kumar, L. & Staver, C.** 2019. Why interventions in the seed systems of roots, tubers and bananas crops do not reach their full potential. *Food Security*, 11: 23–42.
- Altermatt, F.** 2010. Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277: 1281–1287.
- Altizer, S., Ostfeld, R.S., Johnson, P.T.J., Kutz, S. & Harvell, C.D.** 2013. Climate change and infectious diseases: From evidence to a predictive framework. *Science*, 341: 514–519.
- Amanifar, N., Taghavi, M., Izadpanah, K. & Babaei, G.** 2014. Isolation and pathogenicity of *Xylella fastidiosa* from grapevine and almond in Iran. *Phytopathologia Mediterranea*, 53(2): 318–327.
- Anderegg, W.R.L., Kane, J.M. & Anderegg, L.D.L.** 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, 3: 30–36.
- Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R. & Daszak, P.** 2004. Emerging infectious diseases of plants: Pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 19: 535–544.
- Angelotti, F., Hamada, E., Magalhaes, E.E., Ghini, R., Garrido, L.D.R. & Junior, M.J.P.** 2017. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Brasilia, 52: 426–434.
- Aukema, J.E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K.O., Englin, J., Frankel, S.J. et al.** 2011. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. *PLoS ONE* 6(9): e24587 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024587>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A.J. & Morales, C.** 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7: 303–321.
- Bairstow, K.A., Clarke, K.L., McGeoch, M.A. & Andrew, N.R.** 2010. Leaf miner and plant galler species richness on Acacia: Relative importance of plant traits and climate. *Oecologia*, 163: 437–448.
- Bajwa, A.A., Farooq, M., Al-Sadi, A.M., Nawaz, A., Jabran, K. & Siddique, K.H.M.** 2020. Impact of climate change on biology and management of wheat pests. *Crop Protection*, 137: 105304 [онлайн]. [По состоянию на 31 марта 2021 года]. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105304>
- Bale, J.S. & Hayward, S.A.L.** 2010. Insect overwintering in a changing climate. *The Journal of Experimental Biology*, 213: 980–994.
- Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H.J., Moretti, A., Camardo Leggieri, M., Brera, C., Rortais, A. et al.** 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6: 24328 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1038/srep24328>



- Battisti, A.** 2008. Forests and climate change; lessons from insects. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 1: 1–5 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3832/ifor0210-0010001>
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. & Larsson, S.** 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12: 662–667.
- Bebber, D.P., Ramotowski, M.A.T. & Gurr, S.J.** 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*, 3: 985–988.
- Bentz, B.J. & Jönsson, A.M.** 2015. Modeling bark beetle responses to climate change. In F.E. Vega & R.W. Hofstetter, eds. *Bark beetles – biology and ecology of native and invasive species*, pp. 533–553. Cambridge MA, Academic Press, Elsevier.
- Bergsma-Viami, M., van de Bilt, J.L.J., Tjou-Tam-Sin, N.N.A., van de Vossenbergh, B.T.L.H. & Westenberg, M.** 2015. *Xylella fastidiosa* in *Coffea arabica* ornamental plants imported from Costa Rica and Honduras in The Netherlands. *Journal of Plant Pathology*, 97: 395.
- Betz, O., Srisuka, W. & Puthz, V.** 2020. Elevational gradients of species richness, community structure, and niche occupation of tropical roove beetles (Coleoptera: Staphylinidae: Steninae) across mountain slopes in Northern Thailand. *Evolutionary Ecology*, 34: 193–216.
- Biber-Freudenberger, L., Ziemacki, J., Tonnang, H.E.Z. & Borgemeister, C.** 2016. Future risks of pest species under changing climatic conditions. *PLoS ONE*, 11: e0153237 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153237>
- Billore, S.D.** 2019. Weeds in soybean vis-à-vis other crops – a review. *Soybean Research*, 17: 1–21.
- Bingna, H., Feifei, C., Yue, S., Kun, Q., Yan, W., Changjiao, S., Xiang, Z. et al.** 2018. Advances in targeted pesticides with environmentally responsive controlled release by nanotechnology. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 8(2): 102 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3390/nano8020102>
- Björkman, C. & Niemelä, P.** 2015. *Climate change and insect pests*. Wallingford, UK, CABI.
- Bonello, P., Campbell, F.T., Cipollini, D., Conrad, A.O., Farinas, C., Gandhi, K.J.K., Hain, F.P. et al.** 2020. Invasive tree pests devastate ecosystems – a proposed new response framework. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3: 2 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00002>
- Borkataki, S., Reddy, M.D., Nanda, S.P. & Taye, R.R.** 2020. Climate change and its possible impact on the existence of insect pests. *Ecology, Environment and Conservation*, 26: S271–S277.
- Bosso, L., Russo, D., Febbraro, M.D., Cristinzio, G. & Zoina, A.** 2016. Potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Italy: A maximum entropy model. *Phytopathologia Mediterranea*, 55: 62–72.
- Bregaglio, S., Donatelli, M. & Confalonieri, R.** 2013. Fungal infections of rice, wheat, and grape in Europe in 2030–2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 33: 767–776.
- Burne, A.R.** 2019. *Pest risk assessment: Halyomorpha halys (Brown marmorated stink bug)*. Version 1, June 2019. Ministry for Primary Industries, New Zealand.
- Butterworth, M.H., Semenov, M.A., Barnes, A., Moran, D., West, J.S. & Fitt, B.D.L.** 2010. North–south divide: Contrasting impacts of climate change on crop yields in Scotland and England. *Journal of the Royal Society Interface*, 7: 123–130.
- CABI.** 2021a. *Bursaphelenchus xylophilus* (pine wilt nematode) datasheet. In *Invasive Species Compendium* [онлайн]. Wallingford, UK, CABI. [По состоянию на 16 марта 2021 года]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/10448#todistribution>
- CABI.** 2021b. *Agrilus planipennis* (emerald ash borer) datasheet. In *Invasive Species Compendium* [онлайн]. Wallingford, UK, CABI. [По состоянию на 19 марта 2021 года]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/3780#todistribution>
- CABI.** 2021c. *Bactrocera oleae* (olive fruit fly) datasheet. In *Invasive Species Compendium* [онлайн]. Wallingford, UK, CABI. [По состоянию на 19 марта 2021 года]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/17689#todistribution>
- Carvajal-Yepes, M., Cardwell, K., Nelson, A., Garrett, K.A., Giovani, B., Saunders, D., Kamoun, S. et al.** 2019. A global surveillance system for crop diseases. *Science*, 364: 1237–1239.

- Castellanos-Frias, D., de Leon, D.G., Bastida, F. & Gonzalez-Andujar, J.L.** 2016. Predicting global geographical distribution of *Lolium rigidum* (rigid ryegrass) under climate change. *The Journal of Agricultural Science*, 154: 755–764.
- Castillo, N.E.T., Melchior-Martinez, E.M., Sierra, J.S.O., Ramirez-Mendoza, R.A., Parra-Saldivar, R. & Iqbal, H.M.N.** 2020. Impact of climate change and early development of coffee rust – an overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico. *Science of the Total Environment*, 738: 140225.
- Chakraborty, S. & Newton, A.C.** 2011. Climate change, plant diseases and food security: An overview. *Plant Pathology*, 60: 2–14.
- Chakraborty, S., Pangga, I.B. & Roper, M.M.** 2012. CLIMATE CHANGE AND MULTITROPHIC INTERACTIONS IN SOIL: THE PRIMACY OF PLANTS AND FUNCTIONAL DOMAINS. *GLOBAL CHANGE BIOLOGY*, 18: 2111–2125.
- Chang, F.P., Kuang, L.Y., Huang, C.A., Jane, W.N., Hung, Y., Hsing, Y.I. & Mou, C.Y.** 2013. A simple plant gene delivery system using mesoporous silica nanoparticles as carriers. *Journal of Materials Chemistry B: Materials for Biology and Medicine*, 1(39): 5279–5287 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1039/c3tb20529k>
- Chen, J. & Henny, R.J.** 2006. Somaclonal variation: An important source for cultivar development of floriculture crops. In J.A. Teixeira da Silva, ed. *Floriculture, ornamental and plant biotechnology, Volume II*, pp. 244–253. London, Global Science Books.
- Choudhary, J.S., Kumari, M. & Fand, B.B.** 2019. Linking insect pest models with climate change scenarios to project against future risks of agricultural insect pests. *CAB Reviews*, 14: 055 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://www.cabi.org/cabreviews/review/20193460085>
- Cilas, C. & Bastide, P.** 2020. Challenges to cocoa production in the face of climate change and spread of pests and diseases. *Agronomy*, 10: 1232 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Clements, D.R. & DiTommaso, A.** 2011. Climate change and weed adaptation: Can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? *Weed Research*, 51: 227–240.
- Clements, D.R., DiTommaso, A. & Hyvönen, T.** 2014. Ecology and management of weeds in a changing climate. In B.S. Chauhan & G. Mahajan, eds. *Recent advances in weed management*, pp. 13–37. New York, USA, Springer Science + Business Media.
- Cooke, D.E.L., Cano, L.M., Raffaele, S., Bain, R.A., Cooke, L.R., Etherington, G.J., Deahl, K.L. et al.** 2012. Genome analyses of an aggressive and invasive lineage of the Irish potato famine pathogen. *PLoS Pathogens* 8(10): e1002940 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002940>
- Cornara, D., Morente, M., Markheiser, A., Bodino, N., Tsai, C.-W., Fereres, A., Redak, R.A., Perring, T.M. & Lopes, J.R.S.** 2019. An overview on the worldwide vectors of *Xylella fastidiosa*. *Entomologia Generalis*, 39(3–4): 157–181.
- Cunningham, F.J., Goh, N.S., Demirer, G.S., Matos, J.L. & Landry, M.P.** 2018. Nanoparticle-mediated delivery towards advancing plant genetic engineering. *Trends in Biotechnology*, 36(9): 882–897.
- Daughtrey, M. & Buitenhuis, R.** 2020. Integrated pest and disease management in greenhouse ornamentals. In M.L. Gullino, R. Albajes & P.C. Nicot, eds. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, pp. 625–679. Dordrecht, The Netherlands, Springer Nature.
- Day, R., Quinlan, M. & Ogutu, W.** 2006. *Analysis of the application of the phytosanitary capacity evaluation tool*. Report to the Secretariat of the International Plant Protection Convention.
- Debelo, D.G.** 2020. Predictions of climate change impacts on agricultural insect pests vis-à-vis food crop productivity: A critical review. *Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development*, 7: 18–26.
- Delcour, I., Spanoghe, P. & Uyttendaele, M.** 2015. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International*, 68: 7–15.
- Delucia, E.H., Nability, P.D., Zavala, J.A. & Berenbaum, M.R.** 2012. Climate change: Resetting plant-insect interactions. *Plant Physiology*, 160: 1677–1685.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Huey, R.B., Shelton, K.S., Ghalambor, C.K., Haak, D.C. & Martin, P.R.** 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 105: 6668–6672.

- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R.B. & Naylor, R.L.** 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361: 915–919.
- Diamond, S.E.** 2018. Contemporary climate-driven range shifts: Putting evolution back on the table. *Functional Ecology*, 32: 1652–1665.
- Dilling, L., Daly, M.E., Travis, W.R., Wilhelmi, O.V. & Klein, R.A.** 2015. The dynamics of vulnerability: Why adapting to climate variability will not always prepare us for climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6: 413–425.
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E.S.G. & Staver, C.P.** 2018. Fusarium wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1468 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Diyanat, M., Saeidian, H., Baziar, S. & Mirjafary, Z.** 2019. Preparation and characterization of polycaprolactone nanocapsules containing pretilachlor as a herbicide nanocarrier. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(21): 21579–21588 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05257-0>
- Donovan, G.H., Butry, D.T., Michael, Y.L., Prestemon, J.P., Liebhold, A.M., Demetrios Gatzolis, D. & Mao, M.Y.** 2013. The relationship between trees and human health: Evidence from the spread of the emerald ash borer. *American Journal of Preventive Medicine*, 44(2): 139–145.
- Duan, J.J., Bauer, L.S., Van Driesche, R., Schmude, J.M., Petrice, T., Chandler, J.L. & Elkinton, J.** 2020. Effects of extreme low winter temperatures on the overwintering survival of the introduced larval parasitoids *Spathius galinae* and *Tetrastichus planipennis*: Implications for biological control of emerald ash borer in North America. *Journal of Economic Entomology*, 113: 1145–1151.
- Duncan, L.W.** 2009. Managing nematodes in citrus orchards. In A. Ciancio & K.G. Mukerji, eds. *Integrated management of fruit crops and forest nematodes*, pp. 135–173. Dordrecht, The Netherlands, Springer Science+Business Media B.V.
- Duran, A., Gryzenhout, M., Slippers, B., Ahumada, R., Rotella, A., Flores, F., Wingfield, B.D. & Wingfield, M.J.** 2008. *Phytophthora pinifolia* sp. nov. associated with a serious needle disease of *Pinus radiata* in Chile. *Plant Pathology*, 57: 715–727.
- Eastburn, D.M., McElrone, A.J. & Bilgin, D.D.** 2011. Influence of atmospheric and climate change on plant-pathogen interactions. *Plant Pathology*, 60: 54–69.
- Edmonds, R.L.** 2013. General strategies of forest disease management. In P. Gonthier & G. Nicolotti, eds. *Infectious forest diseases*, pp. 29–49. Wallingford, UK and Boston, MA, CABI.
- Eigenbrode, S.D., Davis, T.S. & Crowder, D.W.** 2015. Climate change and biological control in agricultural systems: Principles and examples from North America. In C. Björkman & P. Niemelä, eds. *Climate change and insect pests*, pp. 119–135. Wallingford, UK, CABI.
- El-Mergawy, R.A.A.M. & Al-Ajlan, A.M.** 2011. Red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier): Economic importance, biology, biogeography and integrated pest management. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 1: 1–23.
- El-Sabea, A.M., Faleiro, J. & Abo-El-Saad, M.M.** 2009. The threat of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* to date plantations of the Gulf region in the Middle-East: An economic perspective. *Outlooks on Pest Management*, 20(3): 131–134.
- EPPO** (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2020a. A1 list of pests recommended for regulation as quarantine pests, version 2020-09. In *European and Mediterranean Plant Protection Organization* [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. [https://www.eppo.int/ACTIVITIES/plant\\_quarantine/A1\\_list](https://www.eppo.int/ACTIVITIES/plant_quarantine/A1_list)
- EPPO** (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2020b. First report of *Spodoptera frugiperda* in Israel. EPPO Reporting Service No. 08-2020: 2020/161. In *EPPO Global Database* [онлайн]. Paris. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://gd.eppo.int/reporting/article-6839>
- EPPO** (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2021a. *Anoplophora glabripennis*. EPPO datasheets on pests recommended for regulation. In *EPPO Global Database* [онлайн]. [По состоянию на 20 февраля 2021 года]. <https://gd.eppo.int/taxon/ANOLGL/datasheet>

- EPPO** (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2021b. *Agrilus planipennis*. EPPO datasheet as updated in January 2021. In *EPPO Global Database* [онлайн]. [По состоянию на 20 февраля 2021 года]. <https://gd.eppo.int/taxon/AGRLPL/datasheet>
- EPPO** (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2021c. Current global distribution of *Vactrocera dorsalis* (DACUDO) as registered in January 2021 and reporting service articles. In *EPPO Global Database* [онлайн]. [По состоянию на 20 февраля 2021 года]. <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/distribution> and <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/reporting>
- Erikson, L. & Griffin, R.** 2014. The international regulatory framework. In G. Gordh & S. McKirdy, eds. *The handbook of plant biosecurity*, pp. 27–44. Dordrecht, The Netherlands, Springer Science+Business Media.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M.A., Gladders, P. & Fitt, B.D.L.** 2008. Range and increase of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface*, 5: 625–631.
- Fahim, M.A., Hassanein, M.K., Abou Hadid, A.F. & Kadah, M.S.** 2011. Impacts of climate change on the widespread and epidemics of some tomato diseases during the last decade in Egypt. *Acta Horticulturae*, 914: 317–320.
- Fahim, M.A., Hassanein, M.K. & Mostafa, M.H.** 2003. Relationships between climatic conditions and potato late blight epidemic in Egypt during winter seasons 1999–2001. *Applied Ecology and Environmental Research*, 1(1–2): 159–172.
- Falco, S.D., Adinolfi, F., Bozzola, M. & Capitanio, F.** 2014. Crop insurance as a strategy for adapting to climate change. *Journal of Agricultural Economics*, 65: 485–504.
- FAO.** 2008. *Climate-related transboundary pests and diseases. Technical background document from the Expert consultation held on 25 to 27 February 2008*. Rome, FAO. 59 pp. (также доступно по адресу <http://www.fao.org/3/a-ai785e.pdf>).
- FAO.** 2020. *Red palm weevil: Guidelines on management practices*. Rome, FAO, ix + 86 pp. (также доступно по адресу <https://doi.org/10.4060/ca7703en>).
- FAO.** 2021a. *Desert locust upsurge – progress report on the response in Southwest Asia (May–December 2020)*. Rome, FAO. 18 pp. (также доступно по адресу <http://www.fao.org/3/cb2358en/cb2358en.pdf>).
- FAO.** 2021b. *Strategic framework for the International Plant Protection Convention (IPPC) 2020–2030*. Rome, FAO on behalf of the IPPC Secretariat. 40 pp.
- Fedchock, C., Gould, W.P., Hennessey, M.K., Mennig, X. & Sosa, E.** 2006. *Trip report – Spanish lemon site visit: September 23–30, 2006*. Riverdale, USA, United States Department of Agriculture, Animal and Plant Health Inspection Services.
- Fiaboe, K.K.M., Peterson, A.T., Kairo M.T.K. & Roda, A.L.** 2012. Predicting the potential worldwide distribution of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) using ecological niche modeling. *Florida Entomologist*, 95: 559–673.
- Flitters, N.E.** 1963. Observations on the effect of hurricane “Carla” on insect activity. *International Journal of Biometeorology*, 6: 85–92.
- Frank, S.D.** 2020. Review of the direct and indirect effects of warming and drought on scale insect pests of forest systems. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, сраа033 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa033>
- Frem, M., Chapman, D., Fucilli, V., Choueiri, E., Moujabber, M.E., Notte, P.L. & Nigro, F.** 2020. *Xylella fastidiosa* invasion of new countries in Europe, the Middle East and North Africa: Ranking the potential exposure scenarios. *NeoBiota*, 59: 77–97 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3897/neobiota.59.53208>
- Fussmann, K.E., Schwarzmüller, F., Brose, U., Jousset, A. & Rall, B.C.** 2014. Ecological stability in response to warming. *Nature Climate Change*, 4: 206–210.
- García-Bastidas, F.A., Quintero-Vargas, Ayala-Vasquez, M., Schermer, T, Seidl, M.F., Santos-Paiva, M., Noguera A.M. et al.** 2019. First report of Fusarium wilt tropical race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Disease* [онлайн]. [По состоянию на 31 марта 2021 года]. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>
- Garibaldi, A. & Gullino, M.L.** 1995. Focus on critical issues in soil and substrate disinfestation towards the year 2000. *Acta Horticulturae*, 382: 21–36.

- Garibaldi, L., Kitzberger, T. & Chaneton, E.J.** 2011. Environmental and genetic control of insect abundance and herbivory along a forest elevational gradient. *Oecologia*, 167: 117–129.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R., Andersen, K.F., Brawner, J., Choudhury, R., Delaquis, E., Fayette, J., Poudel, R., Purves, D. & Rothschild, J.** 2020b. Effective altruism as an ethical lens on research priorities. *Phytopathology*, 110: 708–722.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Buddenhagen, C.E., Choudhury, R.A., Fulton, J.C., Hernandez Nopsa, J.F., Poudel, R. & Xing, Y.** 2018. Network analysis: A systems framework to address grand challenges in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 559–580.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Choudhury, R.A., Dantes, W., Fayette, J., Fulton, J.C., Poudel, R. & Staub, C.G.** 2020a. Adapting disease management systems under global change. In J.B. Ristaino & A. Records, eds. *Emerging plant diseases and global food security*, pp. 1–13. St. Paul, USA, APS Press.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N. & Travers, S.E.** 2006. Climate change effects on plant disease: Genomes to ecosystems. *Annual Review of Phytopathology*, 44: 489–509.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. & Sparks, A.H.** 2016. Plant pathogens as indicators of climate change. In T.M. Letcher, ed. *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 2<sup>nd</sup> edn, pp. 325–338. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. & Sparks, A.H.** 2021. Plant pathogens as indicators of climate change. In T.M. Letcher, ed. *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 3<sup>rd</sup> edn, pp. 499–513. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Ge X., He, S., Wang, T., Yan, W. & Zong, S.** 2015. Potential distribution predicted for *Rhynchophorus ferrugineus* in China under different climate warming scenarios. *PLoS ONE* 10(10): e0141111 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141111>
- Ghini, R., Bettiol, W. & Hamada, E.** 2011. Diseases in tropical plantation crops as affected by climate changes: Current knowledge and perspectives. *Plant Pathology*, 60: 122–132.
- Ghini, R., Hamada, E. & Bettiol, W.** 2008. Climate change and plant diseases. *Scientia Agrícola*, 65: 98–107.
- Ghini, R., Hamada, E. & Bettiol, W.** 2011. *Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil*. Brasília, DF, Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente.
- Ghini, R., Hamada, E., Pedro Júnior, M.J. & Gonçalves, R.R.V.** 2011. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. *Summa Phytopathologica*, 37: 85–93.
- Gilardi, G., Garibaldi, A. & Gullino, M.L.** 2018. Emerging pathogens as a consequence of globalization and climate change: Leafy vegetables as a case study. *Phytopathologia Mediterranea*, 57: 146–152.
- Gilardi, G., Gisi, U., Garibaldi, A. & Gullino, M.L.** 2017. Effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on the chemical and biological control of powdery mildew of zucchini and the Phoma leaf spot of leaf beet. *European Journal Plant Pathology*, 148: 229–236.
- Giovani, B., Blümel, S., Lopian, R., Teulon, D., Bloem, S., Galeano Martínez, C., Beltrán Montoya, C. et al.** 2020. Science diplomacy for plant health. *Nature Plants*, 6: 902–905.
- Gitaitis, R. & Walcott, R.** 2007. The epidemiology and management of seedborne bacterial diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 45: 371–397.
- Godefroid, M., Cruaud, A., Rossi, J.P. & Rasplus, J.Y.** 2015. Assessing the risk of invasion by tephritid fruit flies: Intraspecific divergence matters. *PLoS ONE*, 10: e0135209 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135209>
- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.C., Rasplus, J.Y. & Rossi, J. P.** 2018. Climate change and the potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Europe. *bioRxiv*, hal-02791548f [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://hal.inrae.fr/hal-02791548/document>
- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.-C., Rasplus, J.-Y. & Rossi, J.-P.** 2019. *Xylella fastidiosa*: Climate suitability of European continent. *Scientific Reports*, 9: 8844 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45365-y>

- Godefroid, M., Morente, M., Schartel, T., Cornara, D., Purcell, A., Gallego, D., Moreno, A., Pereira, J.A. & Fereres, A.** 2020. The risk of *Xylella fastidiosa* outbreaks will decrease in the Mediterranean olive-producing regions. *bioRxiv* [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1101/2020.07.16.206474>
- Goergen, G., Kumar, P.L., Sankung, S.B., Togola, A. & Tamò, M.** 2016. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa. *PLoS ONE* 11(10): e0165632. [онлайн]. [По состоянию на 15 марта 2021 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165632>
- Goswami, A., Roy, I., Sengupta, S. & Debnath, N.** 2010. Novel applications of solid and liquid formulations of nanoparticles against insect pests and pathogens. *Thin Solid Films*, 519(3): 1252–1257.
- Gouache, D., Bensadoun, A., Brun, F., Page, C., Makowski, D. & Wallach, D.** 2013. Modelling climate change impact on *Septoria tritici* blotch (STB) in France: Accounting for climate model and disease uncertainty. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 242–252.
- Gouache, D., Roche, R., Pieri, P. & Bancal, M.O.** 2011. Evolution of some pathosystems on wheat and vines. In N. Brisson & F. Levrault, eds. *The green book of the CLIMATOR project (2007–2010): Climate change, agriculture and forests in France – simulations of the impacts on the main species*, Section B5 Health, The Topics, pp. 113–126. France, Agency for the Environment and Energy Management (ADEME).
- Gregory, P.J., Johnson, S.N., Newton, A.C. & Ingram, J.S.I.** 2009. Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2827–2838.
- Grillo, R., Dos Santos, N.Z.P., Maruyama, C.R., Rosa, A.H., de Lima, R. & Fraceto, L.F.** 2012. Poly( $\epsilon$ -caprolactone) nanocapsules as carrier systems for herbicides: Physico-chemical characterization and genotoxicity evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 231–232: 1–9.
- Grünig, M., Mazzi, D., Calanca, P., Karger, D.N. & Pellissier, L.** 2020. Crop and forest pest metawebs shift towards increased linkage and suitability overlap under climate change. *Communications Biology*, 3: 233 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0962-9>
- Gullino, M.L., Gilardi, G. & Garibaldi, A.** 2014a. Seed-borne pathogens of leafy vegetable crops. In M.L. Gullino & G. Munkvold, eds. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, pp. 47–53. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. & Garibaldi, A.** 2014b. Chemical and non-chemical seed dressing for leafy vegetable crops. In M.L. Gullino & G. Munkvold, eds. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, pp. 125–136. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. & Garibaldi, A.** 2019. Ready-to-eat salad crops: A plant pathogen's heaven. *Plant Disease*, 103: 2153–2170.
- Gullino, M.L. & Munkvold, G., eds.** 2014. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*. Dordrecht, The Netherlands, Springer. 136 pp.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Gilardi, G. & Garibaldi, A.** 2018. Effect of increased CO<sub>2</sub> and temperature on plant diseases: A critical appraisal of results obtained in studies carried out under controlled environment facilities. *Journal of Plant Pathology*, 100: 371–389.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Paravicini, A., Casulli, E., Rettori, A., Sanna, M. & Garibaldi, A.** 2011. New phytotron for studying the effect of climate change on plant pathogens. *Journal of Agricultural Engineering*, 1: 1–11.
- Gullino, M.L., Tabone, G., Gilardi, G. & Garibaldi, A.** 2020. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on the management of powdery mildew of zucchini. *Journal of Phytopathology*, 168: 405–415.
- Gutierrez, A.P., Ponti, L. & Cossu, Q.A.** 2009. Effects of climate warming on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy. *Climatic Change*, 95: 195–217.
- Haack, R.A., Jendek, E., Liu, H.P., Marchant, K.R., Petrice, T.R., Poland, T.M. & Ye, H.** 2002. The emerald ash borer: A new exotic pest in North America. *Newsletter of the Michigan Entomological Society*, 47: 1–5.
- Hakata, M., Wada, H., Masumoto-Kubo, C., Tanaka, R., Sato, H. & Morita, S.** 2017. Development of a new heat tolerance assay system for rice spikelet sterility. *Plant Methods*, 13(1): 34 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0185-3>

- Hannukkala, A.O., Kaukoranta, T., Lehtinen, A. & Rahkonen, A.** 2007. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933–2002: Increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. *Plant Pathology*, 56: 167–176.
- Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson, A.P., Ostfeld, R.S. & Samuel, M.D.** 2002. Climate warming and disease risk for terrestrial and marine biota. *Science*, 296: 2158–2162.
- Harvey, J.A., Heinen, R., Gols, R. & Thakur, M.P.** 2020. Climate change-mediated temperature extremes and insects: From outbreaks to breakdowns. *Global Change Biology*, 26: 6685–6701.
- Heeb, L., Jenner, E. & Cock, M.J.W.** 2019. Climate-smart pest management: Building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *Journal of Pest Science*, 92: 951–969.
- Heltberg, R., Siegel, P.B. & Jorgensen, S.L.** 2009. Addressing human vulnerability to climate change: Toward a ‘no-regrets’ approach. *Global Environmental Change*, 19: 89–99.
- Heraud, J.** 2018. Blue River Technology. *Resource*, 25(6): 12–12.
- Herms, D.A. & McCullough, D.G.** 2014. Emerald ash borer invasion of North America: History, biology, ecology, impacts, and management. *Annual Review of Entomology*, 59: 13–30.
- Hill, M.P. & Thomson, L.J.** 2015. Species distribution modelling in predicting response to climate change. In C. Björkman & P. Niemelä, eds. *Climate change and insect pests*, pp. 16–37. Wallingford, UK, CABI.
- Hoffmann, A.A., Rymer, P.D., Byrne, M., Ruthrof, K.X., Whinam, J., McGeoch, M., Bergstrom, D.M. et al.** 2019. Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. *Austral Ecology*, 44: 3–27.
- Howden, S.M., Gifford, R.G. & Meinke, H.** 2010. Grains. In C. Stokes & M. Howden, eds. *Adapting agriculture to climate change: Preparing Australian agriculture for the future*, pp. 21–40. Melbourne, Australia, CSIRO.
- Hu, J., Angeli, S., Schuetz, S., Luo, Y. & Hajek, A.E.** 2009. Ecology and management of exotic and endemic Asian longhorned beetle *Anoplophora glabripennis*. *Agricultural and Forest Entomology*, 11: 359–375.
- Huang, J. & Hao, H.** 2020. Effects of climate change and crop planting on the abundance of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Ecology and Evolution*, 10: 1324–1338.
- Hunjan, M.S. & Lore, J.S.** 2020. Climate change: Impact on plant pathogens, diseases, and their management. In K. Jabran, S. Florentine & B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, pp. 85–100. Springer International Publishing.
- Ikegami, M. & Jenkins, T.A.R.** 2018. Estimate global risks of a forest disease under current and future climates using distribution model and simple thermal model – pine wilt disease as a model case. *Forest Ecology and Management*, 409: 343–352.
- Ingram, J.S.I., Gregory, P.J. & Izac, A.-M.** 2008. The role of agronomic research in climate change and food security policy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126(1–2): 4–12.
- IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley, eds). Cambridge, United Kingdom and New York, USA, Cambridge University Press. 1535 pp.
- МГЭИК** (Межправительственная группа экспертов по изменению климата), 2014а: *Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата* [основная группа авторов, Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 163 стр. (также доступно по адресу [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_ru.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf)).
- МГЭИК** (Межправительственная группа экспертов по изменению климата), 2014б.: *Изменение климата, 2014 г.: Воздействия, адаптация и уязвимость – Резюме для политиков. Вклад Рабочей группы II в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата* [Филд, К. Б., В. Р. Баррос, Д. Дж. Доккен, К. Дж. Мак, М. Д. Мастрандреа, Т. Е. Билир, М. Чаттерджи, К. Л. Эби, Й. О. Эстрада, Р. К. Дженова, Б. Джирма, Е. С. Киссел, А. Н. Леви, С. Маккракен, П. Р. Мастрандреа и Л. Л. Уайт (редакторы)]. Всемирная Метеорологическая Организация, Женева, Швейцария, 34 стр. (также доступно по адресу [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_ru.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_ru.pdf)).

- IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. *Global warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani *et al.*, eds.). Geneva, Switzerland, IPCC. 630 pp.
- IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019a. *Special report on climate change and land* [онлайн]. [По состоянию на 19 марта 2021 года]. <https://www.ipcc.ch/srcl/>
- IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019b. *Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* [онлайн]. [По состоянию на 19 марта 2021 года]. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- Секретариат МККЗР**. 1997. *Международная конвенция по карантину и защите растений*. Рим, Секретариат МККЗР, ФАО. (также доступно по адресу <https://www.ipcc.int/ru/publications/1997-international-plant-protection-convention-new-revised-text/>).
- IPPC Secretariat**. 2012. *IPPC national phytosanitary capacity development strategy* [онлайн]. Rome, IPPC Secretariat, FAO. 27 pp. [По состоянию на 6 апреля 2021 года]. <https://assets.ipcc.int/static/media/files/publication/en/2016/01/IPPCCapacityDevelopmentStrategy-en.pdf>
- IPPC Secretariat**. 2016. *Plant pest surveillance: A guide to understand the principal requirements of surveillance programmes for national plant protection organizations* [онлайн]. Rome, IPPC Secretariat, FAO. [По состоянию на 6 апреля 2021 года]. <http://www.fao.org/3/ca3764en/CA3764EN.pdf>
- IPPC Secretariat**. 2020a. The first detection of *Spodoptera frugiperda*, fall armyworm (FAW), in United Arab Emirates. Pest report, 10 May 2020. *In International Plant Protection Convention* [онлайн]. Rome, FAO. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://www.ipcc.int/en/countries/ united-arab-emirates/pestreports/2020/05/the-first-detection-of-fall-armywormfam-spodoptera-frugiperda-in-united-arab-emirates/>
- IPPC Secretariat**. 2020b. Report of first detection of *Spodoptera frugiperda*, fall armyworm (FAW) in Jordan. Pest report, 27 September 2020. *In International Plant Protection Convention* [онлайн]. Rome, FAO. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://www.ipcc.int/en/countries/jordan/pestreports/2020/09/report-of-first-detection-of-spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-faw-in-jordan-1/>
- IPPC Secretariat**. 2021. *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm) detections in Australia. Pest report, 5 May 2021. *In International Plant Protection Convention* [онлайн]. Rome, FAO. [По состоянию на 20 мая 2021 года]. <https://www.ipcc.int/en/countries/australia/pestreports/2021/05/spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-detections-australia/>
- Iscaro, J.** 2014. The impact of climate change on coffee production in Colombia and Ethiopia. *Global Majority E-Journal*, 5: 33–43.
- МСФМ 2.** 2019. *Структура анализа фитосанитарного риска*. Рим, Секретариат МККЗР, ФАО.
- МСФМ 5.** *Глоссарий фитосанитарных терминов*. Рим, Секретариат МККЗР, ФАО.
- МСФМ 6.** 2018. *Надзор*. Рим, Секретариат МККЗР, ФАО.
- МСФМ 11.** 2019. *Анализ фитосанитарного риска для карантинных вредных организмов*. Рим, Секретариат МККЗР, ФАО.
- МСФМ 20.** 2019. *Руководство по фитосанитарной системе регламентации импорта*. Рим, Секретариат МККЗР, ФАО.
- МСФМ 21.** 2019. *Анализ фитосанитарного риска для регулируемых некарантинных вредных организмов*. Рим, Секретариат МККЗР, ФАО.
- Jabran, K., Florentine, S. & Chauhan, B.S.** 2020. Impacts of climate change on weeds, insect pests, plant diseases and crop yields: Synthesis. *In* K. Jabran, S. Florentine & B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, pp. 189–196. Springer International Publishing.
- Jactel, H., Desprez-Loustau, M.L., Battisti, A., Brockerhoff, E., Santini, A., Stenlid, A., Björkman, C. *et al.*** 2020. Pathologists and entomologists must join forces against forest pest and pathogen invasions. *NeoBiota*, 58: 107–127.
- Jactel, H., Koricheva, J. & Castagneyrol, B.** 2019. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35: 103–108.



- Janse, J.D. & Obradovic, A.** 2010. *Xylella fastidiosa*: Its biology, diagnosis, control and risks. *Journal of Plant Pathology*, 92: 35–48.
- Jeger, M., Bragard, C., Caffier, D., Candresse, T., Chatzivassiliou, E., Dehnen-Schmutz, K., Gilioli, G. *et al.*** 2018. Pest risk assessment of *Spodoptera frugiperda* for the European Union. *EFSA Journal*, 16(8): 5351 [онлайн]. [По состоянию на 6 апреля 2021 года]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5351>
- Jeger, M.J. & Pautasso, M.** 2008. Plant disease and global change – the importance of long-term data sets. *New Phytologist*, 177: 8–11.
- Jones, J.T., Haegeman, A., Danchin, E.G.J., Gaur, H.S., Helder, J., Jones, M.G.K., Kikuchi, T. *et al.*** 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 14: 946–961.
- Jones, R.A.C.** 2016. Future scenarios for plant virus pathogens as climate change progresses. *Advances in Virus Research*, 95: 87–147.
- Jönsson, A.M., Harding, S., Krokene, P., Lange H., Lindelöw Å., Økland B., Ravn H.P. & Schroeder M.** 2011. Modelling the potential impact of global warming on *Ips typographus* voltinism and reproductive diapause. *Climatic Change*, 109: 606–718.
- Junk, J., Jonas, M. & Eickermann, M.** 2016. Assessing meteorological key factors influencing crop invasion by pollen beetle (*Meligethes aeneus* F.) – past observations and future perspectives. *Meteorologische Zeitschrift*, 25: 357–364.
- Juroszek, P., Racca, P., Link, S., Farhumand, J. & Kleinhenz, B.** 2020. Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology*, 69: 179–193.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A.** 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathology*, 60: 100–112.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A.** 2013a. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: A review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*, 151: 163–188.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A.** 2013b. Climate change and potential future risks through wheat diseases. *European Journal of Plant Pathology*, 136: 21–33.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A.** 2013c. Climatic changes and the potential future importance of maize diseases: A short review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 120: 49–56.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A.** 2015. Linking plant disease models to climate change scenarios to project future risks of crop diseases: A review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 3–15.
- Karaca, M. & Dursun, S.S.** 2020. Possible effects of climate change on weeds in agriculture. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 34: 111–117.
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Alemardan, A., Petropoulos, S. & Bilalis, D.** 2018. Interference of weeds in vegetable crop cultivation, in the changing climate of Southern Europe with emphasis on drought and elevated temperatures: A review. *The Journal of Agricultural Science*, 156: 1175–1185.
- Kellermann, V. & van Heerwaarden, B.** 2019. Terrestrial insects and climate change: Adaptive responses in key traits. *Physiological Entomology*, 44: 99–115.
- Kimathi, E., Tonnang, H.E.Z., Subramanian, S., Cressman, K., Abdel-Rahman, E.M., Tesfayohannes, M., Niassy, S., Torto B. *et al.*** 2020. Prediction of breeding regions for the desert locust *Schistocerca gregaria* in East Africa. *Scientific Reports* 10: 11937 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68895-2>
- King, M., Altdorff, D., Li, P., Galagedara L., Holden, J. & Unc, A.** 2018. Northward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports*, 8: 7904 [онлайн]. [По состоянию на 31 марта 2021 года]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26321-8>
- Kocmánková, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Dubrovský, M., Štěpánek, P., Semerádová, D., Balek J. *et al.*** 2011. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests at high spatial resolution: A novel approach. *The Journal of Agricultural Science*, 149: 185–195.

- Koo, T.H., Hong, S.J. & Yun, S.C.** 2016. Changes in the aggressiveness and fecundity of hot pepper anthracnose pathogen (*Colletotrichum acutatum*) under elevated CO<sub>2</sub> and temperature over 100 infection cycles. *The Plant Pathology Journal*, 32: 260–265.
- Koricheva, J. & Larsson, S.** 1998. Insect performance on experimentally stressed woody plants: A meta-analysis. *Annual Review Entomology*, 43: 195–216.
- Korres, N.E., Norsworthy, J.K., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T.K., Loka, D.A., Oosterhuis, D.M., Gealy, D.R. et al.** 2016. Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36: 12 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0350-5>
- Kremer, P., Schlüter, J., Racca, P., Fuchs, H.J. & Lang, C.** 2016. Possible impact of climate change on the occurrence and the epidemic development of cercospora leaf spot disease (*Cercospora beticola* sacc.) in sugar beets for Rhineland-Palatinate and the southern part of Hesse. *Climatic Change*, 137: 481–494.
- Kriticos, D.J., Watt, M.S., Potter, K.J.B., Mannig, L.K., Alexander, N.S. & Tallent-Halsell, N.** 2011. Managing invasive weeds under climate change: Considering the current and potential future distribution of *Buddleja davidii*. *Weed Research*, 51: 85–96.
- Kumar, N. & Khurana, S.M.P.** 2020. Invasion of major fungal diseases in crop plants and forest trees due to recent climate fluctuations. In A. Raj, M.K. Jhariya, D.K. Yadav & A. Banerjee, eds. *Climate Change and Agroforestry Systems: Adaptation and Mitigation Strategies*, Chapter 8, pp. 209–236. Burlington, Canada, Apple Academic Press.
- Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., de Cortazar-Atauri, I.G., Bancal, M.O. & Brisson, N.** 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197: 147–158.
- Launay, M., Zurfluh, O., Huard, F., Buis, F., Bourgeois, G., Caubel, J., Huber, L. & Bancal, M.O.** 2020. Robustness of crop disease response to climate change signal under modelling uncertainties. *Agricultural Systems*, 178: 102733.
- Leguizamón, E.S. & Acciaresi, H.A.** 2014. Climate change and the potential spread of *Sorghum halepense* in the central area of Argentina based on growth, biomass allocation and eco-physiological traits. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 26: 101–113.
- Lehmann, P., Ammunet, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S.D., Jepsen, J.U., Kalinkat, G. et al.** 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18: 141–150.
- Liang, L. & Fei, S.** 2014. Divergence of the potential invasion range of emerald ash borer and its host distribution in North America under climate change. *Climatic Change*, 122: 735–746.
- Liebhold, A.M. & Kean, J.M.** 2019. Eradication and containment of non-native forest insects: Successes and failures. *Journal of Pest Science*, 92: 83–91.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D. & Henry, K.** 2014. Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4: 1068–1072.
- Litkas, V.D., Migeon, A., Navajas, M., Tixier, M.S. & Stavrinides, M.C.** 2019. Impacts of climate change on tomato, a notorious pest and its natural enemy: Small scale agriculture at higher risk. *Environmental Research Letters*, 14: 084041 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3313>
- Liu, T., Wan, A., Liu, D. & Chen, X.** (2017). Changes of races and virulence genes in *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the wheat stripe rust pathogen, in the United States from 1968 to 2009. *Plant Disease*, 101: 1522–1532.
- Lopian, R.** 2018. *Climate change, sanitary and phytosanitary measures and agricultural trade. The state of agricultural commodity markets (SOCO) 2018: Background paper*. Rome, FAO. 48 pp. (также доступно по адресу <http://www.fao.org/3/CA2351EN/ca2351en.pdf>).
- Loustau, D., Ogee J., Dufrene, E., Deque, M., Duponey, J.I., Badeau, V., Viovy, N. et al.** 2007. Impacts of climate change on temperate forests and interaction with management. In P.H. Freer-Smith, M.S.J. Broadmeadow & J.M. Lynch, eds. *Forestry and climate change*, pp. 243–250. Wallingford, UK, CABI.
- Luck, I., Spackman, M., Freeman, A., Trebicki, P., Griffiths, W., Finlay, K. & Chakraborty, S.** 2011. Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathology*, 60: 113–121.
- Luo, Y., TeBeest, D.O., Teng, P.S. & Fabellar, N.G.** 1995. Simulation studies on risk analysis of rice blast epidemics associated with global climate change in several Asian countries. *Journal of Biogeography*, 22: 673–678.

- Luo, Y., Teng, P.S., Fabellar, N.G. & TeBeest, D.O.** 1998. The effects of global temperature change on rice leaf blast epidemics: a simulation study in three agroecological zones. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 68: 187–196.
- Macfayden, S., McDonald, G. & Hill, M.P.** 2018. From species distributions to climate change adaptation: Knowledge gaps in managing invertebrate pests in broad-acre grain crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253: 208–219.
- Maclean, I.M.D.** 2020. Predicting future climate at high spatial and temporal resolution. *Global Change Biology*, 26(2): 1003–1011.
- Madgwick, J.W., West, J.S., White, R.P., Semenov, M.A., Townsend, J.A., Turner, J.A. & Fitt, B.D.L.** 2011. Impacts of climate change on wheat anthesis and fusarium ear blight in the UK. *European Journal of Plant Pathology*, 130: 117–131.
- Magan, N., Medina, A. & Aldred, D.** 2011. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre-and postharvest. *Plant Pathology*, 60: 150–163.
- McConnachie, A.J., Strathie, L.W., Mersie, W., Gebrehiwot, L., Zewdie, K., Abdurehim, A., Abrha, B., Araya, T., Asaregew, F., Assefa, F., Gebre-Tsadik, R., Nigatu, L., Tadesse, B. & Tana, T.** 2011. Current and potential geographical distribution of the invasive plant *Parthenium hysterophorus* (Asteraceae) in eastern and southern Africa. *Weed Research*, 51: 71–84.
- Manisankar, G. & Ramesh, T.** 2019. Response of weeds under elevated CO<sub>2</sub> and temperature: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP2: 427–431.
- Marshall, K.E., Gotthard, K. & Williams, C.M.** 2020. Evolutionary impacts of winter climate change on insects. *Current Opinion in Insect Science*, 41: 54–62.
- Massad, T.J. & Dyer, L.A.** 2010. A meta-analysis of the effects of global environmental change on plant–herbivore interactions. *Arthropod-Plant Interactions*, 4: 181–188.
- Matzrafi, M., Seiwert, B., Reemtsma, T., Rubin, B. & Peleg, Z.** 2016. Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification. *Planta*, 244: 1217–1227.
- McCullough, D.G., Work, T.T., Cavey, J.F., Liebhold, A.M. & Marshall, D.** 2006. Interceptions of nonindigenous plant pests at US ports of entry and border crossings over a 17-year period. *Biological Invasions*, 8: 611–630.
- Medina, A., Akbar, A., Baazeem, A., Rodriguez, A. & Managan, N.** 2017. Climate change, food security and mycotoxins. Do we know enough? *Fungal Biology Reviews*, 31(3): 143–154.
- Mehmood, M.Z., Afzal, O., Aslam, M.A., Riaz, H., Raza, M.A., Ahmed, S., Qadir, G. et al.** 2020. Disease modeling as a tool to assess the impacts of climate variability on plant diseases and health. In M. Ahmed, ed. *Systems modeling*, pp. 327–351. Singapore, Springer Nature Singapore.
- Melloy, P., Hollaway, G., Luck, J., Norton, R., Aitken, E. & Chakraborty, S.** 2010. Production and fitness of *Fusarium pseudograminearum* inoculum at elevated carbon dioxide in FACE. *Global Change Biology*, 16: 3363–3373.
- Meurisse, N., Rassati, D., Hurley, B.P., Brockerhoff, E.G. & Haack, R.A.** 2019. Common pathways by which non-native forest insects move internationally and domestically. *Journal of Pest Science*, 92: 13–27.
- Meynard, C.N., Gay, P.E., Lecoq, M., Foucart, A., Piou, C. & Chapuis, M.P.** 2017. Climate-driven geographic distribution of the desert locust during recession periods: Subspecies' niche differentiation and relative risks under scenarios of climate change. *Global Change Biology*, 23: 4739–4749.
- Miedaner, T. & Juroszek, P.** 2021a. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theoretical and Applied Genetics* [онлайн]. [По состоянию на 13 марта 2021 года]. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03807-0>
- Miedaner, T. & Juroszek, P.** 2021b. Global warming and increasing maize cultivation demand comprehensive efforts in disease and insect resistance breeding in north-western Europe. *Plant Pathology* [онлайн]. [По состоянию на 26 февраля 2021 года]. <https://doi.org/10.1111/ppa.13365>
- Mikkelsen, B.L., Jørgensen, R.B. & Lyngkjær, M.F.** 2014. Complex interplay of future climate levels of CO<sub>2</sub>, ozone and temperature on susceptibility to fungal diseases in barley. *Plant Pathology*, 64: 319–327.
- Misra, A.K., Yadav, S.B., Mishra, S.K. & Tripathi, M.K.** 2020. Impact of meteorological variables and climate change on plant diseases. In P. Kumar, A.K. Tiwari, M. Kamle, Z. Abbas & P. Singh, eds. *Plant pathogens – detection and management for sustainable agriculture*, pp. 313–327. Oakville, Ontario, Canada, Apple Academic Press.

- Moriyama, M. & Numata, H.** 2019. Ecophysiological responses to climate change in cicadas. *Physiological Entomology*, 44: 65–76.
- Mostert, D., Molina, A.B., Daniells, J., Fourie, G., Hermanto, C., Chao, C.P., Fabregar, E. et al.** 2017. The distribution and host range of the banana Fusarium wilt fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, in Asia. *PLoS ONE*, 12: e0181630 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181630>
- Munkvold, G.P.** 2009. Seed pathology progress in the academia and industry. *Annual Review of Phytopathology*, 47: 285–311.
- Munkvold, G.P. & Gullino, M.L.** 2020. Seed and propagative material. In M.L. Gullino, R. Albajes & P.C. Nicot, eds. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, pp. 331–354. Dordrecht, The Netherlands, Springer Nature.
- Naidu, V.S.G.R.** 2015. Climate change, crop-weed balance and the future of weed management. *Indian Journal of Weed Science*, 47: 288–295.
- Niblack, T.L.** 2005 Soybean cyst nematode management reconsidered. *Plant Disease*, 89: 1020–1026.
- O'Bannon, J.H. & Tomerlin, A.T.** 1973. Citrus tree decline caused by *Pratylenchus coffeae*. *Journal of Nematology*, 5: 311–316.
- Oliveira, H., Stolf-Moreira, R., Martinez, C., Grillo, R., Jesus, M. & Fraceto, L.** 2015. Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants. *PLoS ONE*, 10(7): e0132971 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132971>
- Ormsby, M. & Brenton-Rule, E.** 2017. A review of global instruments to combat invasive alien species in forestry. *Biological Invasions*, 19: 3355–3364.
- Paini, D.R., Mwebaze, P., Kuhnert, P.M. & Kriticos, D.J.** 2018. Global establishment threat from a major forest pest via international shipping: *Lymantria dispar*. *Scientific Reports*, 8: 13723. [онлайн] [По состоянию на 12 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31871-y>
- Palmer, G., Platts, P.J., Brereton, T., Chapman, J.W., Dytham, C., Fox, R., Pearce-Higgins, J.W., Roy, D.B., Hill, J.K. & Thomas, C.D.** 2017. Climate change, climatic variation and extreme biological responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 372: 20160144.
- Paraschivu, M., Cotuna, O., Paraschivu, M. & Olaru, L.** 2019. Effects of interaction between abiotic stress and pathogens in cereals in the context of climate change: An overview. *Annals of the University of Craiova*, XLIX: 413–424.
- Paterson, R.R.M. & Lima, N.** 2019. Ecology and biotechnology of thermophilic fungi on crops under global warming. In S.M. Tiquia-Arashiro & M. Grube, eds. *Fungi in extreme environments: Ecological role and biotechnological significance*, pp. 81–96. Springer International Publishing.
- Pautasso, M.** 2013. Responding to diseases caused by exotic tree pathogens. In P. Gonthier & G. Nicolotti, eds. *Infectious forest diseases*, pp. 29–49. Wallingford, UK and Boston, USA, CAB.
- Pautasso, M., Doring, T.F., Garbelotto, M., Pellis, L. & Jeger, M.J.** 2012. Impacts of climate change on plant diseases – opinions and trends. *European Journal of Plant Pathology*, 133: 295–313.
- Pegg, K.G., Coates, L.M., O'Neill, W.T. & Turner, D.W.** 2019. The epidemiology of Fusarium wilt of banana. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1395 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01395>
- Pegg, G., Taylor, T., Entwistle, P., Guymmer, G., Giblin, F. & Carnegie, A.** 2017. Impact of *Austropuccinia psidii* (myrtle rust) on Myrtaceae-rich wet sclerophyll forests in south east Queensland. *PLoS ONE* 12(11): e0188058 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188058>
- Peng, H.X.X., Sivasithamparam, K. & Turner, D.W.W.** 1999. Chlamyospore germination and Fusarium wilt of banana plantlets in suppressive and conducive soils are affected by physical and chemical factors. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 1363–1374.
- Perez, C., Nicklin, C., Dangles, O., Vanek, S., Sherwood, S., Halloy, S., Garrett, K.A. & Forbes, G.** 2010. Climate change in the high Andes: Implications and adaptation strategies for small-scale farmers. *International Journal of Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability*, 6: 71–88.
- Perrone, G., Ferrara, M., Medina, A., Pascale, M. & Magan, N.** 2020. Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: Ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk. *Microorganisms*, 8: 1496 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101496>

- Peters, K., Breitsameter, L. & Gerowitt, B.** 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 707–721.
- Peterson, A.T, Menon, S. & Li, X.** 2010. Recent advances in the climate change biology literature: Describing the whole elephant. *WIREs Climate Change*, 1: 548–555.
- Ploetz, R.C.** 2005. Panama disease, an old nemesis rears its ugly head: Part 1 – The beginnings of the banana export trades. *Plant Health Progress*, 6(1) [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1094/PHP-2005-1221-01-RV>
- Ploetz, R.C. & Pegg, K.G.** 2000. Fungal diseases of root, corm and pseudostem. In D.R. Jones, ed. *Diseases of banana abacá and enset*, pp. 143–172. Wallingford, UK, CABI.
- Porter, J.R., Challinor, A.J., Henriksen, C.B., Howden, S.M., Martre, P. & Smith, P.** 2019. IPCC, agriculture and food – a case of shifting cultivation and history. *Global Change Biology*, 25(8): 2518–2529.
- Prank, M., Kenaley, S.C., Bergstrom, G.C., Acevedo, M. & Mahowald, N.M.** 2019. Climate change impacts the spread of wheat stem rust, a significant crop disease. *Environmental Research Letters*, 14: 124053 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab57de>
- Preisler, A.C., Pereira, A.E., Campos, E.V., Dalazen, G., Fraceto, L.F. & Oliveira, H.C.** 2020. Atrazine nanoencapsulation improves pre-emergence herbicidal activity against *Bidens pilosa* without enhancing long-term residual effect on *Glycine max*. *Pest Management Science*, 76(1): 141–149.
- Pritchard, S.G.** 2011. Soil organisms and global climate change. *Plant Pathology*, 60: 82–99.
- Priyanka, A.K.M., Varma, S., Kumar, V. & Sharma, R.S.** 2020. Impact of climate change on plant diseases and management strategies: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8: 2968–2973.
- Pugliese, M., Gullino, M.L. & Garibaldi, A.** 2010. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on interactions of grapevine and powdery mildew: First results under phytotron conditions. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117: 9–14.
- Qin, Z., Zhang, J.E., Di Tommaso, A., Wang, R.I. & Liang, K.M.** 2016. Predicting the potential distribution of *Lantana camara* L. under RCP scenarios using ISI-MIP models. *Climatic Change*, 134: 193–208.
- Racca, P., Kakau, J., Kleinhenz, B. & Kuhn, C.** 2015. Impact of climate change on the phenological development of winter wheat, sugar beet and winter oilseed rape in Lower Saxony, Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 16–27.
- Raderschall, C.A., Vico, G., Lundin, O., Taylor, A.R. & Bommarco, R.** 2021. Water stress and insect herbivory interactively reduce crop yield while the insect pollination benefit is conserved. *Global Change Biology*, 27: 71–83.
- Rai, M. & Ingle, A.** 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94 (2): 287–293 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3969-4>
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C. & Biswas, P.** 2018. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6487–6503.
- Ramesh, K., Matloob, A., Aslam, F., Florentine, S.K. & Chauhan, B.S.** 2017. Weeds in a changing climate: Vulnerabilities, consequences, and implications for future weed management. *Frontiers in Plant Science*, 8: 95 [онлайн]. [По состоянию на 28 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00095>
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L. & Shabani, F.** 2017. Future climate scenarios project a decrease in the risk of fall armyworm outbreaks. *The Journal of Agricultural Science*, 155(8): 1219–1238.
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L. & Shabani, F.** 2019. Suitable areas of *Phakopsora pachyrhizi*, *Spodoptera exigua*, and their host plant *Phaseolus vulgaris* are projected to reduce and shift due to climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 135: 409–424.
- Ramsfield, T.D., Bentz, B.J., Faccoli, M., Jactel, H. & Brockerhoff, E.G.** 2016. Forest health in a changing world: Effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. *Forestry*, 89: 245–252.
- Rathee, M. & Dalal, P.** 2018. Emerging insect pests in Indian agriculture. *Indian Journal of Entomology*, 80: 267–281.

- Reineke, A. & Thiéry, D.** 2016. Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming. *Journal of Pest Science*, 89: 313–328.
- Revich, B., Tokarevich, N. & Parkinson, A.J.** 2012. Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic. *International Journal of Circumpolar Health*, 71: 18792 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3402/ijch.v71i0.18792>
- Reynaud, B., Delatte, H., Peterschmitt, M. & Fargette, D.** 2009. Effects of temperature increase on the epidemiology of three major vector-borne viruses. *European Journal of Plant Pathology*, 123: 269–280.
- Richerzhagen, D., Racca, P., Zeuner, T., Kuhn, C., Falke, K., Kleinhenz, B. & Hau, B.** 2011. Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of *Cercospora* leaf spot in Lower Saxony. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 118: 168–177.
- Rizzo, D., Garbelotto, M. & Hansen, E. M.** 2005. *Phytophthora ramorum*: Integrative research and management of an emerging pathogen in California and Oregon forests. *Annual Review of Phytopathology*, 43: 309–335.
- Robinet, C. & Roques, A.** 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integrative Zoology*, 5: 132–142.
- Roth, M.G., Webster, R.W., Mueller, D.S., Chilvers, M.I., Fasje, T.R., Mathew, F.M., Bradley, C.A., Damicone, J.P., Kabbage, M. & Smith, D.L.** 2020. Integrated management of important soybean pathogens of the United States in changing climate. *Journal of Integrated Pest Management*, 11: 17 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa013>
- Ruttledge, A. & Chauhan, B.S.** 2020. Climate change and weeds of cropping systems. In K. Jabran, S. Florentine & B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, pp. 57–84. Springer International Publishing.
- Sabry, K. & Ragaie, M.** 2018. Nanotechnology and their applications in insect's pest control. In K.A. Abd-Elsalam & R. Prasad, eds. *Nanobiotechnology applications in plant protection*, pp. 1–28. Cham, Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91161-8>.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rettori, A., Rossi, V., Tubiello, F.N., Spanna, F., Rosenzweig, C. & Gullino, M.L.** 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology*, 12: 1299–1307.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rossi, V., Tubiello, F.N., Rosenzweig, C. & Gullino, M.L.** 2007. Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change: Elaboration and application of an empirical-statistical model. *EPPO Bulletin*, 37: 317–326.
- Salvacion, A.R., Cumagun, C.J.R., Pangga, I.B., Magcale-Macandog D.B., Cruz, P.C.S., Saludes, R.B., Solpot, T.C. & Aguilar, E.A.** 2019. Banana suitability and Fusarium wilt distribution in the Philippines under climate change. *Spatial Information Research*, 27: 339–349.
- Santini, A. & Battisti, A.** 2019. Complex insect–pathogen interactions in tree pandemics. *Frontiers in Physiology*, 10: 550 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00550>
- Saponari, M., Boscia, D., Nigro, F. & Martelli, G.P.** 2013. Identification of DNA sequences related to *Xylella fastidiosa* in oleander, almond and olive trees exhibiting leaf scorch symptoms in Apulia (Southern Italy). *Journal of Plant Pathology*, 95(3): 668.
- Saunders, D.G.O., Pretorius, Z.A. & Hovmøller, M.S.** 2019. Tackling the re-emergence of wheat stem rust in Western Europe. *Communications Biology*, 2: 51 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0294-9>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N. & Nelson, A.** 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3: 430–439. **Scalone, R., Lemke, A., Stefanic, E., Kolseth, A.K., Rasic, S. & Andersson, L.** 2016. Phenological variation in *Ambrosia artemisiifolia* L. facilitates near future establishment at northern latitudes. *PLoS ONE*, 11: e0166510 [онлайн]. [По состоянию на 31 марта 2021 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166510>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C.L., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., Butchart, S.H.M. *et al.*** 2016. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354 (6313): aaf7671.

- Schneider, K., van der Werf, W., Cendoya, M., Mourits, M., Navas-Cortes J.A., Vicent, A. & Lansink, A.O.** 2020. Impact of *Xylella fastidiosa* subspecies *pauca* in European olives. *PNAS*, 117: 9250–9259.
- Schumann, G.L.** 1991. *Plant diseases: Their biology and social impact*. St Paul, USA, APS Press.
- Scott, N.R., Chen, H. & Cui, H.** 2018. Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6451–6456.
- Scott, P. & Williams, N.** 2014. Phytophthora diseases in New Zealand forests. *New Zealand Journal of Forestry*, 59: 14–21.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano G., Wild, J. et al.** 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7: 395–402.
- Shabani, F., Ahmadi, M., Kumar, L., Soljouy-Fad, S., Tehrani, M.S., Shabani, F., Kalantar, B. & Esmaeili, A.** 2020. Invasive weed species' threats to global biodiversity: Future scenarios of changes in the number of invasive species in a changing climate. *Ecological Indicators*, 116: 106436 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106436>
- Shabani, F. & Kumar, L.** 2013. Risk levels of invasive *Fusarium oxysporum* f. sp. in areas suitable for date palm (*Phoenix dactylifera*) cultivation under various climate change projections. *PLoS ONE*, 8: e83404 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083404>
- Shaibu, A.S., Li, B., Zhang, S. & Sun, J.** 2020. Soybean cyst nematode-resistance: Gene identification and breeding strategies. *The Crop Journal*, 8(6): 892–904 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.001>
- Sharma, S., Hooda, K.S. & Goswami, P.** 2019. Scenario of plant diseases under changing climate. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8: 2490–2495.
- Shaw, M.W. & Osborne, T.M.** 2011. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. *Plant Pathology*, 60: 31–43.
- Sicard, A., Zeilinger, A.R., Vanhove, M., Schartel, T.E., Beal, D.J., Daugherty, M.P. & Almeida, R.P.P.** 2018. *Xylella fastidiosa*: Insights into an emerging plant pathogen. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 181–202.
- Siciliano, I., Berta, F., Bosio, P., Gullino, M.L. & Garibaldi, A.** 2017a. Effect of different temperatures and CO<sub>2</sub> levels on *Alternaria* toxins produced on cultivated rocket, cabbage and cauliflower. *World Mycotoxin Journal*, 10: 63–71.
- Siciliano, I., Bosio, P., Gilardi, G., Gullino, M.L. & Garibaldi, A.** 2017b. Verrucaric acid and roridin E produced on spinach by *Myrothecium verrucaria* under different temperatures and CO<sub>2</sub> levels. *Mycotoxin Research*, 33: 139–146.
- Sidorova, I. & Voronina, E.** 2020. Terrestrial fungi and global climate change. In J. Marxsen, ed. *Climate change and microbial ecology: Current research and future trends*, 2nd edn, Chapter 5. Poole, UK, Caister Academic Press. (также доступно по адресу <https://doi.org/10.21775/9781913652579.05>).
- Singh, V.K., Shukla, A.K. & Singh, A.K.** 2019. Impact of climate change on plant–microbe interactions under agroecosystems. In K.K. Choudhary, A. Kumar & A.K. Singh, eds. *Climate change and agricultural ecosystems*, pp. 153–179. Cambridge, UK, Woodhead Publishing, Elsevier.
- Skelsey, P., Cooke, D.E.L., Lynott, J.S. & Lees, A.K.** 2016. Crop connectivity under climate change: Future environmental and geographic risks of potato late blight in Scotland. *Global Change Biology*, 22: 3724–3738.
- Sousa, E., Naves, P., Bonifácio, L., Henriques, J., Inácio, M.L. & Evans, H.** 2011. Survival of *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* in pine branches and wood packaging material. *EPPO Bulletin*, 41: 203–207.
- Sparks, A.H., Forbes, G.A., Hijmans, R.J. & Garrett, K.A.** 2014. Climate change may have limited effect on global risk of potato late blight. *Global Change Biology*, 20: 3621–3631.
- Srivastava, A., Kumar, S.N. & Aggarwal, P.K.** 2010. Assessment of vulnerability of sorghum to climate change in India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138: 160–169.
- Stack, J., Fletcher, J. & Gullino, M.L.** 2013. Climate change and plant biosecurity: A new world disorder? In B. Bodo, C. Burnley, I. Comardicea, A. Maas & R. Roffey, eds. *Global environmental change: New drivers for resistance, crime and terrorism*, pp. 161–181. Baden-Baden, Germany, Nomos.

- STDF/World Bank.** 2011. *Climate change and trade: The link to sanitary and phytosanitary standards*. Joint paper of the World Bank, Development Research Group, Trade and International Integration (DECTI) and the Standards and Trade Development Facility (STDF). Geneva, 26 pp. (также доступно по адресу [https://www.standardsfacility.org/sites/default/files/STDF\\_Climate\\_Change\\_EN\\_0.pdf](https://www.standardsfacility.org/sites/default/files/STDF_Climate_Change_EN_0.pdf)).
- St-Marseille, A.F.G., Bourgeois, G., Brodeur, J. & Mimee, B.** 2019. Simulating the impacts of climate change on soybean cyst nematode and the distribution of soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264: 178–187.
- Stoeckli, S., Felber, R. & Haye, T.** 2020. Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology*, 64: 2019–2032 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01992-z>
- Storkey, J., Stratonovitch, P., Chapman, D. & Vidotto, F.** 2014. A process-based approach to predicting the effect of climate change on the distribution of an invasive allergenic plant in Europe. *PLoS ONE*, 9: e88156 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088156>
- Stover, R.H.** 1986. Disease management strategies and the survival of the banana industry. *Annual Review of Phytopathology*, 24: 83–91.
- Strand, J.F.** 2000. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 73–82.
- Sturrock, R.N., Frankel, S.J., Brown, A.V., Hennon, P.E., Kliejunas, J.T. & Lewis, K.J.** 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60: 133–149.
- Su, C., Ji, Y., Gao, S., Cao, S., Xu, X., Zhou, C. & Liu, Y.** 2020. Fluorescence-labeled abamectin nanopesticide for comprehensive control of pinewood nematode and *Monochamus alternatus* hope. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(44): 16555–16564 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05771>
- Suggitt, A.J., Wilson, R.J., Isaac, N.J., Beale, C.M., Auffret, A.G., August, T., Maclean, I.M.D. et al.** 2018. Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change*, 8(8): 713–717.
- Sun, Y., Ding, J., Siemann, E. & Keller, S.R.** 2020. Biocontrol of invasive weeds under climate change: Progress, challenges and management implications. *Current Opinion in Insect Science*, 38: 72–78.
- Sutherst, R.W.** 1991. Pest risk analysis and the greenhouse effect. *Review of Agricultural Entomology*, 79: 1177–1187.
- Sutherst, R.W., Baker, R.H.A., Coakley, S.M., Harrington, R., Kriticos, D.J. & Scherm, H.** 2007. Pest under global change – meeting your future landlords? In J.G. Canadell, D.E. Pataki & L.F. Pitelka, eds. *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Berlin, Springer, pp. 211–226.
- Sutherst, R.W., Constable, F., Finlay, K.J., Harrington, R., Luck, J. & Zalucki, M.P.** 2011. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *WIREs Climate Change*, 2: 220–237.
- Sutherst, R.W., Maywald, G.F. & Russell, B.L.** 2000. Estimating vulnerability under global change: Modular modelling of pests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1–3): 303–319.
- Taylor, R.A.J., Herms, D.A., Cardina, J. & Moore, R.H.** 2018. Climate change and pest management: Unanticipated consequences of trophic dislocation. *Agronomy*, 8(1): 7 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.3390/agronomy8010007>
- Tenllado, F. & Canto, T.** 2020. Effects of a changing environment on the defences of plants to viruses. *Current Opinion in Virology*, 42: 40–46.
- Thomas J.E., Wood, T.A., Gullino, M.L. & Ortu, G.** 2017. Diagnostic tools for plant biosecurity. In M.L. Gullino, J. Stack, J. Fletcher & J. Mumford, eds. *Practical tools for plant and food biosecurity*, pp. 209–226. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Thomas-Sharma, S., Abdurahman, A., Ali, S., Andrade-Piedra, J., Bao, S., Charkowski, A., Crook, D. et al.** 2016. Seed degeneration in potato: The need for an integrated seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology*, 65: 3–16.
- Thomson, L.J., MacFadyen, S. & Hoffmann, A.A.** 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52: 296–306.



- Torney, F., Trewyn, B.G., Lin, V.S.-Y. & Wang, K.** 2007. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. *Nature Nanotechnology*, 2(5): 295–300.
- Torresen, K.S., Fykse, H., Rafoss, T. & Gerowitt, B.** 2020. Autumn growth of three perennial weeds at high latitude benefits from climate change. *Global Change Biology*, 26: 2561–2572.
- Trebicki, P.** 2020. Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286: 198059. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>
- Trebicki, P. & Finlay, K.** 2019. Pests and diseases under climate change; its threat to food security. In S.S. Yadav, R.J. Redden, J.L. Hatfield, A.W. Ebert & D. Hunter, eds. *Food security and climate change*, pp. 229–249. New York, John Wiley & Sons Inc.
- Tresson, P., Brun, L., de Cortazar-Atauri, I.G., Audergon, J.M., Buléon, S., Chenevotot, H., Combe, F. et al.** 2020. Future development of apricot blossom blight under climate change in Southern France. *European Journal of Agronomy*, 112: 125960.
- Tylka, G.L. & Marett, C.C.** 2014. Distribution of the soybean cyst nematode, *Heterodera glycines*, in the United States and Canada: 1954 to 2014. *Plant Health Progress*, 15: 85–87.
- Valerio, M., Tomecek, M.B., Lovelli, S. & Ziska, L.H.** 2011. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C<sub>3</sub> crop and a C<sub>4</sub> weed (*Amaranthus retroflexus*). *Weed Research*, 51: 591–600.
- Van der Fels-Klerx, H.J., Liu, C. & Battilani, P.** 2016. Modelling climate change impacts on mycotoxin contamination. *World Mycotoxin Journal*, 9: 717–726.
- Van der Putten, W.H., Macel, M. & Visser, M.E.** 2010. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: Why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365: 2025–2034.
- Vilà, M., Beaury, E.M., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., Early, R., Laginhas, B.B., Trillo, A., Dukes, J.S., Sorte, C.J.B. & Ibáñez, I.** 2021. Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. *Environmental Research Letters*, 16: 034043.
- Viswanath, K., Sinha, P., Kumar, S.N., Sharma, T., Saxena, S., Panjwani, S., Pathak, H. & Shukla, S.M.** 2017. Simulation of leaf blast infection in tropical rice agro-ecology under climate change scenario. *Climatic Change*, 142: 155–167.
- Wan, J.Z. & Wang, C.J.** 2019. Contribution of environmental factors toward distribution of ten most dangerous weed species globally. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17: 14835–14846.
- Wang, C., Hawthorne, D., Qin, Y., Pan, X., Li, Z. & Zhu, S.** 2017. Impact of climate and host availability on future distribution of Colorado potato beetle. *Scientific Reports*, 7: 4489 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04607-7>
- Wang, C., Zhang, X., Pan, X., Li, Z. & Zhu, S.** 2015. Greenhouses: Hotspots in the invasive network for alien species. *Biodiversity and Conservation*, 24: 1825–1829.
- Wang, R., Li, Q., He, S., Liu, Y., Wang, M. & Jiang, G.** 2018. Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* under climate change in China. *PLoS ONE*, 13: e0192153 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192153>
- Watt, M.S., Kriticos, D.J., Lamoureaux, S.L. & Bourdot, G.W.** 2011. Climate change and the potential global distribution of serrated tussock (*Nassella trichotoma*). *Weed Science*, 59: 538–545.
- Wattanapongsiri, A.** 1966. A revision of the genera *Rhynchophorus* and *Dynamis* (Coleoptera: Curculionidae). *Department of Agriculture Science Bulletin*. Bangkok, Department of Agriculture Science.
- Wells, J.M., Raju, B.C., Hung, H.Y., Weisburg, W.G., Mandelco-Paul, L. & Brenner, D.J.** 1987. *Xylella fastidiosa* gen. nov., sp. nov.: Gram-negative, xylem-limited, fastidious plant bacteria related to *Xanthomonas* spp. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 37(2): 136–143.
- West, A.M., Kumar, S., Wakie, T., Brown, C.S., Stohlgren, J., Laituri, M. & Bromberg, J.** 2015. Using high-resolution future climate scenarios to forecast *Bromus tectorum* invasion in Rocky Mountain National Park. *PLoS ONE*, 10: e0117893 [онлайн]. [По состоянию на 29 декабря 2020 года]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117893>

- Wilkinson, K., Grant, W.P., Green, L.E., Hunter, S., Jeger, M.J., Lowe, P., Medley, G.F. *et al.*** 2011. Infectious diseases of animals and plants: An interdisciplinary approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366: 1933–1942.
- Williams, A.L., Wills, K.E., Janes, J.K., Van der Schoor, J.K., Newton, P.C.D. & Hovenden, M.J.** 2007. Warming and free-air CO<sub>2</sub> enrichment alter demographics in four co-occurring grassland species. *New Phytologist*, 176: 365–374.
- Williamson, V.M. & Gleason, C.A.** 2003. Plant–nematode interactions. *Current Opinion in Plant Biology*, 6: 327–333.
- Wolfe, D.W., Ziska, L., Petzoldt, C., Seaman, A., Chase, L. & Hayhoe, K.** 2008. Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: Implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13: 555–575.
- Woolhouse, M.E.J., Webster, J.P., Domingo, E., Charlesworth, B. & Levin, B.R.** 2002. Biological and biomedical implications of the co-evolution of pathogens and their hosts. *Nature Genetics*, 32 (4): 569–577.
- Wright, D., Hammond, N., Thomas, G., MacLeod, B. & Abbott, L.K.** 2018. The provision of pest and disease information using Information Communication Tools (ICT); an Australian example. *Crop Protection*, 103: 20–29.
- Wu, E., Wang, Y.-P., Yahuza, L., He, M.-H., Sun, D.-L., Huang, Y.-M., Liu, Y.-C., Yang, L.N., Zhu, W. & Zhan, J.** 2020. Rapid adaptation of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* to changing temperature. *Evolutionary Applications*, 13(4): 768–780.
- Wuebbles, D.J. & Hayhoe, K.** 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 57: 177–210.
- Yadav, S., Stow, A.J. & Dudaniec, R.** 2019. Detection of environmental and morphological adaptation despite high landscape genetic connectivity in a pest grasshopper (*Phaulacridium vittatum*). *Molecular Ecology*, 28: 3395–3412.
- Zacarias, D.A.** 2020. Global bioclimatic suitability for the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), and potential co-occurrence with major host crops under climate change scenarios. *Climatic Change*, 161: 555–566.
- Zhao, X., Cui, H., Wang, Y., Sun, C., Cui, B. & Zeng, Z.** 2018. Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6504–651.
- Ziska, L.H., Blumenthal, D.M. & Franks, S.J.** 2019. Understanding the nexus of rising CO<sub>2</sub>, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Science and Management*, 12: 79–88.
- Ziska, L.H., Epstein, P.R. & Schlesinger, W.H.** 2009. Rising CO<sub>2</sub>, climate change, and public health: Exploring the links to plant biology. *Environmental Health Perspectives*, 117: 155–158.











## МККЗР

Международная конвенция по карантину и защите растений (МККЗР) – это международное соглашение по здоровью растений, направленное на защиту глобальных растительных ресурсов и содействие безопасной торговле. Стратегическая концепция МККЗР заключается в том, что все страны располагают потенциалом применять гармонизированные меры по предотвращению интродукции и распространения вредных организмов, а также сводить к минимуму воздействие вредных организмов на продовольственную безопасность, торговлю, экономический рост и окружающую среду.

### Организация

- ◆ Более 180 договаривающихся сторон МККЗР.
- ◆ Каждая договаривающаяся сторона имеет свою национальную организацию по карантину и защите растений (НОКЗР) и официальное контактное лицо по линии МККЗР.
- ◆ 10 Региональных организаций по карантину и защите растений (РОКЗР) было создано для координации деятельности НОКЗР в различных регионах мира.
- ◆ Секретариат МККЗР взаимодействует с соответствующими международными организациями в целях содействия наращиванию регионального и национального потенциала.
- ◆ Секретариат обеспечивается Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО).



### Секретариат Международной конвенции по карантину и защите растений

[ippc@fao.org](mailto:ippc@fao.org) | [www.ippc.int](http://www.ippc.int)

### Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций

Рим, Италия



ISBN 978-92-5-134494-1



9 789251 344941

CB4769RU/1/06.21