

Кризис опыления и вклад в него изменений климата

С.В. Крыленко^{1,2)}, В.В. Ясюкевич¹⁾***

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
биологический факультет
РФ, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

* адрес для переписки: * krylenkoserg@mail.ru, ** v1959@yandex.ru

Реферат. В представленной статье обзореваются современные факты о кризисе опыления, одной из составных частей обсуждаемого шестого глобального вымирания видов. Приводятся как эмпирические результаты наблюдений и экспериментов, так и результаты теоретического моделирования процессов, предполагаемых в будущем. Дается краткий обзор составляющих процесса опыления, а также основных факторов кризиса опыления, к которым относятся: современные способы ведения сельского хозяйства, применение пестицидов, фрагментация среды обитания, отсутствие цветочного разнообразия, конкуренция со стороны инвазивных видов, болезни, хищники, паразиты и изменение климата. Приводится оценка стоимости опыления, а также рассматриваются возможные последствия кризиса опыления для человечества. Особое внимание уделяется влиянию изменений климата как одному из важных факторов кризиса опыления. Подробно рассматриваются виды погодно-климатических воздействий на опылителей, растения и отношения растение-опылитель. Дается характеристика явлению фенологического сдвига, вызванного изменениями дат вылета опылителей, цветения растений из-за повышения средних сезонных температур. В статье собраны факты его проявлений в природе и описаны возможные последствия его дальнейшего развития. Рассматриваются известные факты и последствия сдвигов ареалов опылителей под воздействием климатических изменений, приводящие к пространственному разрыву отношений растение-опылитель. Приводятся факты и результаты моделирований влияния неблагоприятных погодно-климатических явлений и их последствий на опылителей и процесс опыления. Также рассматривается возможность влияния изменений климата на паразитов и хищников опылителей, а также появление новых видов способных наносить ущерб опылителям.

Во второй части рассматривается важность процесса опыления для жизнедеятельности человечества. Рассматриваются возможные и предпринимаемые меры по защите популяций опылителей, в частности: сохранение местообитаний, формирование базы генетических данных разных опылителей, ввод в культуру диких опылителей для интенсификации сельскохозяй-

ственного опыления, адаптация к изменениям климата пчеловодства, предотвращение гибели домашних пчел и диких опылителей.

Ключевые слова. Кризис опыления, глобальные изменения климата, насекомые-опылители, фактор погодно-климатического воздействия.

Pollination crisis and the contribution of climate change

S.V. Krylenko^{1,2)}, V.V. Yasjukevich¹⁾

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology,
1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *krylenkoserg@mail.ru, v1959@yandex.ru*

Abstract. This article reviews the current facts about the pollination crisis, one of the constituent parts of the discussed sixth global extinction of species. Both the empirical results of observations and experiments and the theoretical results of modeling the processes expected in the future are presented. A brief overview of the main factors of the pollination process is discussed, as well as the factors of the pollination factor, which are: modern farming practices, the use of pesticides, fragmentation of the habitat, lack of flower diversity, competition with invasive species, diseases, predators, parasites and climate change. An assessment of the cost of pollination includes possible consequences of the pollination crisis for humanity. Particular attention is paid to the impact of climate change as one of the important factors of the pollination crisis. The types of weather and climatic impacts on pollinators, plants and the plant-pollinator relationship are considered in detail. A characteristic is given to the phenomenon of a phenological shift caused by changes in the increase in average seasonal temperatures, which results in changed dates of emergence of pollinators and flowering of plants.

The article contains the facts of pollination crisis manifestations in nature and describes the possible consequences of its further development. The paper presents examples and results of shifts in the ranges of pollinators under the impact of climatic change, leading to a spatial rupture of the plant-pollinator relationship. The modeling of unfavorable weather and climatic phenomena impacts and their consequences on pollinators and the pollination process are observed. The possibility of the impact of climate change on pollinator parasites and predators is also considered, as well as the invasion of new species capable to damage pollinators.

Keywords. Pollination crisis, global climate change, pollinators, climate event impact.

Введение

В настоящее время широко обсуждается проблема утраты биоразнообразия. В научном сообществе даже встречается мнение, что мир находится в

начале шестого массового вымирания биологических видов (Wagler, 2011; Dirzo et al., 2014; Pievani, 2014). Хозяйственная и иная деятельность людей часто прямо или косвенно приводит к сокращению биологического разнообразия. Особенно уязвимыми оказываются локальные виды (Wagler, 2011; Dirzo et al., 2014; Pievani, 2014), т.е. ареал которых в географическом пространстве очень ограничен вследствие специфичности их требований к условиям среды обитания. В частности, сокращение разнообразия касается и насекомых. Недавно проведенный мета-анализ выявил значительные различия в тенденциях на разных территориях (наиболее сильное сокращение в Северной Америке и некоторых регионах Европы). Также выявлено общее среднее сокращение численности наземных насекомых на $\sim 0.93\%$ в год (Van Klink et al., 2020).

Частью общей проблемы является кризис опыления – наблюдаемое сокращение численности насекомых-опылителей по всему миру (Sánchez-Bayo, Wyckhuys, 2019). В долгосрочной перспективе кризис опыления может привести к серьёзным общемировым последствиям для производства продовольствия, наличия иных биологических ресурсов и сохранения биологического разнообразия. В отечественной научной литературе этому вопросу не уделяется должного внимания, хотя факт снижения разнообразия и численности опылителей отмечается в нескольких работах. К примеру, в 1955-1970 годы на территории Чувашской республики обитало около 30 видов шмелей, а к 2004 году обнаружено лишь 16, сократилась и их численность (Мадебейкин, 2004). Аналогичные данные есть и для Московской области (Ясюкевич и др., 2013).

Сохранение современных темпов сокращения числа опылителей может ухудшить глобальную ситуацию в области продовольственной безопасности (Klein et al., 2007). Кроме того, нарушение опыления диких растений, вызванное сокращением биоразнообразия опылителей, может вызвать каскады вымирания в пищевых цепочках, подрывая целостность экосистем (Biesmeijer et al., 2006). Следует также отметить, что, несмотря на участвовавшие случаи гибели семей среди домашних пчел (*Apis mellifera* Linnaeus, 1758), наблюдаемые во всем мире в последние годы (Decourtye et al., 2019; Potts et al., 2010; Conte, Navajas, 2008; Винобер, 2019), обобщенные данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) показывают, что число домашних медоносных пчел в глобальном масштабе не сокращается (Aizen, Harder, 2009), т.к. поддерживается искусственно. Поэтому явление современного кризиса опыления в основном связано с дикими опылителями.

Цель данной работы – рассмотреть на основе известных публикаций факторы, определяющие кризис опыления, установить место изменения климата в этом явлении на современном этапе, рассмотреть имеющиеся на данный момент в научной литературе факты подтверждающие влияние изменения климата на опылителей, оценить масштабы и структуру данного явления и проявления его в мире и на территории России, рассмотреть возможные экологические и экономические последствия.

Методологические замечания: основные понятия и объекты

Кризис опыления (*pollination crisis*) трактуется как наблюдаемое сокращение численности насекомых-опылителей по всему миру (Sánchez-Bayo, Wyckhuys, 2019) и довольно часто встречается в литературе. При этом происходит смешение понятий. Фактически рассматривается сокращение численности опылителей, которое можно было бы назвать *pollinator crisis*. Но в литературных источниках употребляется именно «кризис опыления». Между тем, сокращение предоставления опылителями экосистемной услуги опыления на современном этапе при задокументированном сокращении численности опылителей в этих работах не рассматривается (за редким исключением). Высказываются предположения, что в перспективе прогрессирующее сокращение численности опылителей может нарушить экосистемные функции опыления, что может негативно сказаться на производстве продуктов сельского хозяйства, в том числе на продовольственной безопасности (Sánchez-Bayo, Wyckhuys, 2019).

Тем не менее, Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (FAO) уже сейчас выражает серьезную обеспокоенность происходящим и учредила «Глобальную программу действий в отношении опылительных услуг в интересах устойчивого сельского хозяйства» (<http://www.fao.org/pollination/projects/ru/>).

Опыление – процесс переноса пыльцы на пестик цветка растения. Для семенных растений опыление является обязательным процессом, без которого невозможно их половое размножение. От эффективности опыления зависит количество и качество плодов растений. Опыление осуществляется либо за счет геофизических процессов (например, переноса пыльцы ветром), либо с помощью животных, чаще всего – насекомых.

Большинство *цветковых растений* (клада Angiospermae) (около 80%) опыляются различными животными (Ackerman, 2000). По оценкам FAO (www.fao.org), из немногим более 100 видов сельскохозяйственных культур, обеспечивающих производство около 90% продовольствия для 146 стран, 71 вид опыляется пчелами (клада Anthophila), несколько видов опыляются осами, двукрылыми (Diptera), жуками (Coleoptera), чешуекрылыми (Lepidoptera), трипсами (Thysanoptera), а единичные виды опыляются позвоночными *животными*. В Европе 222 вида из 264 видов сельскохозяйственных культур являются зоофильными (Williams, 1996; Ollerton et al., 2011), т.е. опыляются с помощью животных. Зоофильные растения составляют большинство среди технических, садовых, бахчевых, масличных, ягодных и кормовых растений. Наиболее важными зоофильными культурами для экономики Российской Федерации являются: *Linum usitatissimum* L., *Helianthus annuus* L., *Glycine max* (L.) Merr., *Brassica napus* L., различные виды горчицы, *Solanum lycopersicum* L., *Fagopyrum esculentum* Moench, *Pisum sativum* L., множество овощей открытого грунта, а также практически все садовые и ягодные культуры. Также от опылителей зависит воспроизводство семян многих овощных и технических культур, важных для эконо-

мики России (*Beta vulgaris* L., *Solanum tuberosum* L., *Brassica oleracea* L., *Daucus carota* L.).

Около 300 000 видов животных посещают цветки покрытосеменных растений, привлекаемые их пыльцой и нектаром (Kearns, 1998). Роль опылителей выполняют птицы, перепончатокрылые (Hymenoptera), имаго чешуекрылых, летучие мыши и двукрылые. Примерно 73% возделываемых культур в мире опыляются пчелами, 19% – мухами, 6.5% – летучими мышами, 5% – осами, 5% – жуками, 4% – птицами и 4% – бабочками (Глухов, 1955; Abrol, 2009; Klein et al., 2007; Doyle et al., 2020; Jauker, Wolters, 2008; Orford et al., 2018; Hahn, Bruhl, 2016; Rader et al., 2016). Как видно, основной группой опыляющих животных являются насекомые. Насекомые-опылители в основном сосредоточены в 4 отрядах: Hymenoptera, Diptera, Lepidoptera и Coleoptera. Основными опылителями являются представители отряда Hymenoptera, а именно настоящие пчёлы (Apidae). Большинство представителей этого семейства либо формируют колонии (одиночные пчёлы), либо являются социальными животными, образуя как небольшие семьи (100-300 особей), так и многочисленные (20000-30000 особей), что увеличивает эффективность опыления в местах их гнездования (Abrol, 2009; Мариковская, 1982).

Многолетние исследования показали, что урожайность опыляемых культур напрямую зависит от числа опылителей в окрестностях их посадок. Например, наличие пасек возле полей гречихи вызывает рост урожая на 20-30% (Глухов, 1955; Малышев, 1963). Наблюдаемое сильное влияние на опыление нескольких одомашненных видов опылителей, в частности медоносной пчелы *A. mellifera*, может привести к выводу о том, что для опыления сельскохозяйственных культур не требуется разнообразных опылителей (Ghazoul, 2005). Однако существуют свидетельства того, что можно выращивать зависящие от опылителей культуры без одомашненных опылителей за счёт деятельности диких опылителей (Hoehn et al., 2008).

Современные данные показывают, что в настоящее время происходит рост потребительского спроса на продукцию опыляемых растений. Он связан с ростом населения Земли, благосостояния и востребованности дорогостоящих плодовоовощных товаров (Aizen, Harder, 2009).

Общая экономическая стоимость опыления (IPEV) оценивается в 153 миллиарда евро, что составляет 9.5% стоимости мирового сельскохозяйственного производства. Стоимость производства (затраты) одной тонны культур, не зависящих от опыления насекомыми, составила в среднем 151 евро, а стоимость производства одной тонны культур, зависящих от опылителей, составила в среднем 761 евро (Gallai et al., 2009).

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) характеризует изменение климата (*climate change*) как «изменение состояния климата, которое может быть определено (например, с помощью статистических тестов) через изменения в средних значениях и/или вариабельности его параметров и которое сохраняется в течение длительного периода, обычно десятилетий или больше. Изменение климата может быть вызвано естественными внутренними процессами или внешними воздействиями, такими, как

модуляции солнечных циклов, извержения вулканов и продолжительные антропогенные изменения в составе атмосферы или в землепользовании» (IPCC, 2018).

Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) определяет *climate change* уже: «изменение климата, которое прямо или косвенно обусловлено деятельностью человека, вызывающей изменения в составе глобальной атмосферы, и накладывается на естественные колебания климата, наблюдаемые на протяжении сопоставимых периодов времени». Далее в статье термин изменение климата будет использоваться в трактовке РКИК ООН.

Опасные гидрометеорологические явления (ОЯ) – природные процессы и явления, возникающие в атмосфере, которые по своей интенсивности (силе), масштабу распространения и продолжительности оказывают или могут оказать поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую природную среду (Второй оценочный доклад..., 2014).

Результаты: некоторые факторы кризиса опыления и его последствия

География кризиса опыления

Кризис опыления рассматривается как глобальный, охватывающий пять континентов, и считается одной из наиболее серьезных экологических проблем антропоцена (Marshman et al., 2019; Kluser, Peduzzi, 2007). Глобальная оценка многолетней динамики численности опылителей, проведенная Межгосударственной научно-политической платформой по биоразнообразию и экосистемным услугам (IPBES, 2016), подтвердила, что популяции диких опылителей сокращаются во многих районах земного шара, при этом особенно существенные потери зарегистрированы в умеренной зоне Северного полушария. В Западной Европе исследования выявили значимое сокращение локального биоразнообразия и уменьшение биомассы диких опылителей в нескольких таксономических группах (Hallmann et al., 2017; Powney et al., 2019; Seibold et al., 2019; Dormann et al., 2008; Williams et al., 2007). В том числе опубликованы примеры для территории России: Чувашской республики (Мадебейкин, 2004) и Московской области (Ясюкевич и др., 2013), но данные являются неполными и фрагментарными. Специальных исследований, подтверждающих сокращение локального разнообразия, на территории России не проводилось. Если рассматривать территориальное распределение работ, посвящённых снижению численности и биоразнообразию насекомых, можно отметить, что наиболее остро эта проблема стоит в странах Европы и США как наиболее развитых, а следовательно, сильнее освоивших свою территорию. Однако следует понимать, что подобные исследования требуют определённых затрат и возможны при должном финансировании (государственные или коммерческие гранты), поэтому их проведение в бедных странах затруднительно, хотя сокращение локального биоразнообразия насекомых в странах Сахеля за счёт опустынивания или в северных штатах

Индии из-за роста антропогенной нагрузки также вероятно. Соответственно наблюдаемая на данный момент картина может отчасти не соответствовать общемировой действительности.

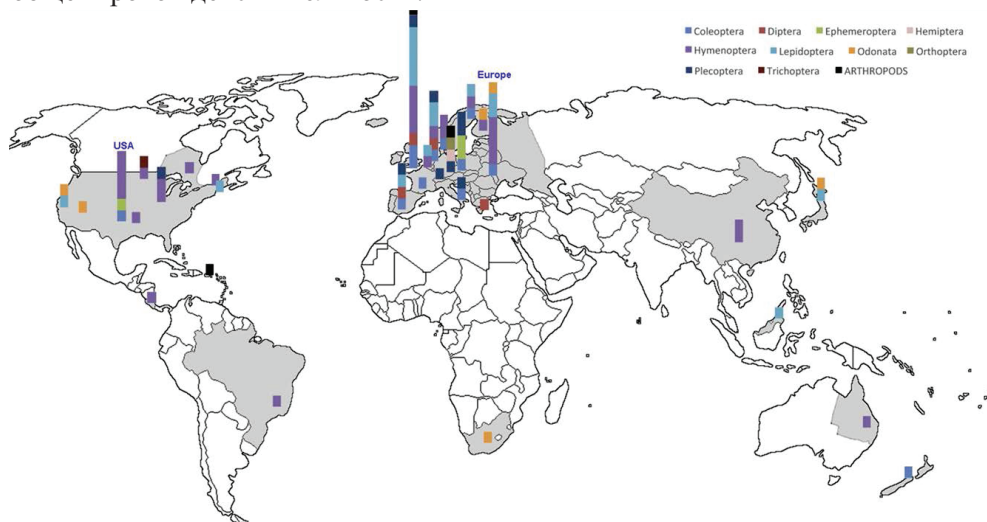


Рисунок 1. Число работ, посвящённых снижению численности и биоразнообразию насекомых (Sánchez-Bayo, Wyckhuys, 2019)

Figure 1. Number of papers on insect population decline and biodiversity (Sánchez-Bayo, Wyckhuys, 2019)

Вероятные причины кризиса опыления

Известные процессы, вызывающие современный кризис опыления, различны по характеру. Однако в большинстве своём они являются антропогенными: современные способы ведения сельского хозяйства, применение пестицидов, фрагментация среды обитания, отсутствие цветочного разнообразия, конкуренция со стороны инвазивных видов, болезни, хищники и паразиты (Kluser, Peduzzi, 2007; Potts et al., 2010). Изменение климата также признается фактором кризиса опыления, что будет подробно рассмотрено в следующем подразделе.

Динамика (в том числе антропогенная) ландшафта происходит на уровне морфологических частей ландшафта и ландшафта в целом (Decourtye et al., 2019) и считается основной причиной изменений в сообществах диких опылителей (например, исчезают подходящие места для гнездования видов рода *Andrena*). Интенсификация сельскохозяйственного производства связана с увеличением поступления пестицидов и удобрений в окружающую среду, а также площади распаханых земель и площадей, занятых монокультурами. Это приводит к сокращению биоразнообразия и разрушению кормовой базы опылителей на данных территориях. Изменения происходят часто за весьма короткий промежуток времени (Decourtye et al., 2019). Например, в последнее время в России (и в целом в мире) случаи массовой гибели одомашненных медоносных пчёл от воздействия пестицидов учащаются, для диких опылителей таких явлений пока не зафиксировано. Это напрямую связано с пробле-

мой неоднозначной аттестации товарных форм некоторых пестицидов и их свободного обращения в России и других странах, а также оценки их влияния на одомашненных медоносных пчёл (Винобер, 2019; Соловьева, 2012; Нурлыгаянов и др., 2019).

На опылителей могут сильно влиять инвазивные виды как животных, так и растений. Инвазии растений могут вызвать изменения в рационе опылителей. Аналогично внедрение опылителей в аборигенные системы может вызывать перестройки в растительных сообществах. А инвазии хищников, например, азиатского шершня в России, способны подорвать популяции опылителей в локальных масштабах или даже региональных масштабах.

Возбудители различных болезней часто вызывают эпизоотии у опылителей. Свою негативную роль играют и паразиты. Например, в связи со всемирным распространением медоносной пчелы она обзавелась большим количеством видов паразитов, которые при проникновении в дикие популяции могут вызывать массовую гибель пчелосемей.

Для России (на примере пчелы медоносной) наиболее характерны следующие факторы: несоблюдение технологии ухода за пчелами и массовое развитие клеща *Varroa* и сопутствующие ему патологии, отравление насекомых химическими веществами (пестициды и гербициды) и несвоевременное информирование пчеловодов о времени, месте и характере химических обработок, импорт пчелосемей, зараженных вирусами, климатические изменения и отсутствие качественного ветеринарного надзора, мониторинга текущего состояния пчелосемей (Винобер, 2019).

Изменение климата в настоящее время рассматривается как один из факторов, вносящих вклад в кризис опыления.

Влияние изменений климата

Как и любые живые организмы, опылители чутко реагируют на изменения абиотических условий среды обитания. Большинство из них относятся к мобильным группам, способным достаточно быстро изменять ареал в ответ на неблагоприятные или, наоборот, благоприятные условия.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) сообщает о зафиксированном повышении температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы в пределах 0.8...1.2°C по отношению к доиндустриальному уровню (1850-1900 гг.) (IPCC, 2018) и о прогнозируемом повышении в пределах 2.0...6.4°C концу XXI века по различным сценариям (IPCC, 2014). Отмечается тенденция роста содержания диоксида углерода в приземном слое атмосферы, среднее содержание диоксида углерода с 2009 года возросло с 387 ppm до 400 ppm уже к 2016 году. Среднегодовая концентрация в 2020 г. достигла очередного максимума – 415 ppm, а максимальные за год концентрации, наблюдаемые в зимние месяцы, превысили значение 420 ppm (Доклад об особенностях климата..., 2021).

Отметим также, что в отличие от остальных факторов кризиса опыления, глобальные изменения климата на коротком временном промежутке (100 лет) несут во многом необратимый характер. Большая часть остальных факторов

вызвана непосредственной деятельностью человека, и в теории такие процессы, как фрагментация ландшафтов и загрязнение пестицидами, вполне можно остановить и контролировать их, применяя уже разработанные методики по сохранению и восстановлению экосистем. Климатические изменения вызваны как антропогенными, так и природными причинами, и имеют далеко идущие последствия на развитие биосферы.

Изменения климата, такие, как постепенное потепление и изменение количества осадков, происходят в широких пространственных и временных масштабах со скоростью, превышающей скорость приспособления экосистем. Повышенная изменчивость климата, повышение его экстремальности, может привести к климатически аномальным сезонам в региональном масштабе, а отдельные аномальные погодные явления могут происходить локально в течение короткого периода времени (Decourtye et al., 2019; González-Varo et al., 2013; Memmott, 2007; Hoover et al., 2012). Изменение климата в западноевропейском и североамериканском научном сообществах считается одной из основных угроз системам растение-опылитель (Hegland et al., 2009; Schweiger et al., 2010).

Рассмотрим воздействие климатического фактора на опылителей и кризис опыления более подробно, по отдельным факторам.

Уровень содержания CO₂ в атмосфере и цветение растений. Обогащение атмосферы углекислым газом влияет не только на фотосинтез растений, но и на систему растение-опылитель. Так, повышенное содержание CO₂ (660 ppm) изменяет производство нектара у растений во время цветения. Это было установлено для *Trifolium pratense* L., *Lotus corniculatus* L., *Scabiosa columbaria* L., *Centaurea jacea* L. и *Betonica officinalis* L., которые являются нектароносными растениями для различных видов опылителей. Количество нектара на цветок не зависело от повышенного содержания CO₂ в тестируемых бобовых (*T. pratense* и *L. corniculatus*), но было значительно снижено у других разнотравных растений. Повышенный уровень CO₂ не оказал значительного влияния на концентрацию и состав сахара в нектаре. Однако *S. columbaria* и *C. jacea* вырабатывают значительно меньше общего сахара при повышенном уровне CO₂ (Rusterholz, Erhardt, 1998). Соответственно, в зависимости от вида медоносного растения воздействие на опылителей может быть положительным или отрицательным (увеличение или уменьшение кормовой базы).

Изменение температуры оказывает существенное воздействие на ряд процессов, связанных с сезонным циклом насекомых-опылителей и самим процессом опыления (Kjohl et al., 2011). Тропические экосистемы чаще испытывают негативные последствия потепления из-за узких границ термостойкости тропических видов растений и опылителей, при том что в тропиках наблюдается сравнительно меньшее повышение температуры (Hegland, 2009).

Существует три варианта реакции популяций насекомых-опылителей на изменение климата: адаптация к новой среде, миграция на территории с подходящим климатом и вымирание. Большинство специалистов считает, что первый вариант маловероятен, так как изменение климата происходит слишком быстро, чтобы популяции опылителей успели выработать генетические

адаптации, хотя у некоторых видов бабочек наблюдается адаптация к изменениям температур в течение нескольких поколений. Например, у *Operophtera brumata* Linnaeus, 1758 гусеницы которой часто питаются на *Quercus robur* L. в результате изменений средних весенних температур происходит рассинхронизация выхода гусениц из яиц и распускания почек на кормовом растении на несколько дней. В результате большое количество гусениц погибает от голода, выживают особи, позднее вышедшие из яиц, застав распускание почек. У выживших особей передается по наследству норма реакции вылупления яиц в следующем поколении, соответствующая изменённой фенологии дуба (Van Asch et al., 2007). Также существуют примеры ограниченной адаптации, у тропического вида *Drosophila birchii* Dobzhansky & Mather, 1961 наблюдается высокая адаптивная способность к высыханию, которая снижается к 30 поколению при постоянных изменениях (Hoffmann et al., 2003). Предполагается, что с повышением температуры многие виды будут смещать ареалы к полюсам. Уже задокументированы результаты обусловленных климатом сдвигов ареалов для сотен видов (Мусолин, Саулич, 2012). Часть видов способна использовать стратегию миграции, как в случае вида *Apis dorsata* Fabricius, 1793 (гигантская пчела), который легко мигрирует в зависимости от времени года и характера цветения. Они покидают свои гнезда и могут преодолевать расстояние до 200 км, спасаясь от голода или хищников, оставив свои гнезда незанятыми на несколько месяцев, а затем возвращаются (Mattila, Otis, 2006).

Изменение температур может влиять на опылителей на разных уровнях. Это может быть прямое влияние на поведение и физиологию особей. Изменения также могут влиять на состав растительных сообществ, а также увеличивать или уменьшать возможности сбора пищи опылителями, влиять на развитие колоний (как у рода *Apis*) (Le Conte, Navajas, 2008), влиять на скорость премагинального развития особей. Например, поскольку у каждой расы медоносных пчел своя скорость развития, то любое изменение климата или перемещение расы медоносных пчел из одного географического локуса в другой неизбежно будет иметь измеримые последствия для цикла их развития.

Последствия изменения климата для насекомых зависят, в частности, от их резистентности к изменениям температуры (Reddy et al., 2013). Например, представители *Aridae*, будучи экзотермичными, требуют повышенной температуры тела для полета. Температура окружающей среды определяет их активность в поисках пищи (Willmer, Stone, 2004; Reddy et al., 2012b). Высокое значение отношения площади поверхности тела к объему у мелких пчел обуславливает быстрое поглощение тепла при высоких температурах окружающей среды. Все пчелы с массой тела более 35 мг (*Apis*, *Bombus*, *Xylocopa* и *Megachile*) способны к эндотермическому нагреванию (Bishop, Ambruster, 1999).

Повышения температур также могут сказываться и на режиме полётов опылителей. Например, в теплицах, где температура может подниматься до 32°C, *Bombus terrestris* (Linnaeus, 1758) опыляют цветки только в утренние и вечерние часы (Лопатин и др., 2007). Кроме того, повышенные температуры

способны снижать жизнеспособность пыльцы. Например, у орхидей при +40°C наблюдается резкое снижение жизнеспособности уже через 2 дня (Pellegrino et al., 2020), что потенциально снижает репродуктивный эффект опыления.

Изменение климата и фенология растений. Известно, что изменение климата приводит к сдвигам фенологических сроков развития растений. Такие сдвиги могут привести к временному несоответствию между периодами активности насекомых-опылителей и их кормовых растений. Фенологический сдвиг складывается из изменения дат начала, пика и окончания периода цветения и из изменения продолжительности периода цветения. Эти изменения могут препятствовать нормальному процессу сбора пыльцы опылителями (Decourtye et al., 2019; Reddy et al., 2012; Memmott, 2007; Hegland, 2009).

Однако следует отметить, что не все виды растений в равной степени подвержены фенологическому сдвигу. На настоящий момент отсутствуют подробные данные о степени чувствительности растений в этом отношении, однако ряд эмпирических работ показывает разнообразие таких ответов. Например, исследование орхидей в Венгрии в период с 1837 по 2011 года показали, что из 39 исследованных таксонов 31 (79%) продемонстрировал явный сдвиг среднего времени начала и окончания цветения. В среднем по всем таксонам период цветения продлился на 3 дня (3.8% периода цветения) в течение последних 50 лет наблюдений по сравнению с периодом до 1960 года. Максимальный зарегистрированный сдвиг начала цветения составил 13.9 суток. Наиболее чувствительными к повышению температур оказались ранневесенние орхидеи, использующие обманный (без выработки нектара) способ опыления (Molnár et al., 2012).

Аналогичные результаты получены для 385 британских видов растений, которые за десятилетний период (1990-2000 гг.) зацветали на 4.5 суток раньше по сравнению с предыдущими четырьмя десятилетиями. При этом 16% видов зацвели значительно раньше в 1990-х годах, чем в предыдущий период, при среднем сдвиге на 15 дней за десятилетие. Десять видов в 1990-е годы зацвели значительно позже, чем раньше. У растений, опыляемых насекомыми, наблюдался более значительный сдвиг дат начала и окончания цветения в обоих направлениях в ответ на усиление потепления (Fitter, Fitter, 2002).

Наблюдения, проводимые в Токио в течение 25-летнего периода (1981-2005 гг.) для 97 видов деревьев, выявили смещение дат начала цветения в среднем на 5.5 дней на более ранние даты (Miller-Rushing et al., 2007).

В целом в Европе (результаты для 542 видов растений) цветение начиналось на 2.5 суток раньше, чем в предшествующие 1971-2000 годы. Однако отметим, что 22% растений не реагировали на изменения, а 3% наоборот задержались с цветением (Menzel et al., 2006). Кроме того, к факторам определяющим начало цветения относятся число солнечных дней, количество осадков, влажность почвы и время таяния снега, а также комбинации этих факторов. При их изменениях происходит более раннее или более позднее цветение (Dunne et al., 2003).

Потепление может влиять также на продолжительность периода цветения в горных регионах. Например, эксперименты по имитации потепления (подогрев почвы) в альпийских регионах обнаружили как признаки более длительного цветения (Dunne et al., 2003), так и отсутствие изменений в продолжительности цветения (Price, Waser, 1998). Повышенные весенние температуры влияют и на репродуктивное усилие: повышение наблюдается в арктических и альпийских регионах, а в других может происходить снижение обилия цветов (Hegland, 2009).

Изменение климата и фенология опылителей. Кроме изменения сроков цветения изменение термического режима может влиять на сроки вылета насекомых-опылителей и на продолжительность периода их активности. Как и в предыдущих случаях, реакции на потепление могут быть разными. Параметры среды, контролирующие фенологию опылителей, включают максимальную температуру за сутки, число дней со среднесуточной температурой выше определенного порога, продолжительность светового дня, отсутствие заморозков и время таяния снежного покрова (Reddy et al., 2013).

Процессы сдвига дат первого вылета насекомых-опылителей наблюдаются во многих странах, в том числе и в Испании. Там с 1970-х годов по 2000 гг. наблюдается четкая тенденция к повышению средней температуры весной, в то же время чаще стали наблюдаться кратковременные возвратные заморозки. Вследствие этого, на примере двух видов – *A. mellifera* и бабочки *Pieris rapae* (L.) – был показан сдвиг даты первого появления (в среднем, на 6 дней раньше). Возникает эффект десинхронизации: начало активности опылителей не соответствует началу цветения, а при наложении возвратных заморозков происходит вымирание особей (Gordo, Sanz, 2006).

Ещё один пример фенологических изменений был получен для различных видов дневных бабочек (например, *Vanessa atalanta* Linnaeus, 1758 и *Pieris napi* Linnaeus, 1758) на острове Великобритания. На более ранние сроки сдвинулись даты первого появления вылета дневных бабочек, а также увеличилась продолжительность лёта (с 5 до 11 недель у *P. napi*) в период потепления с 1976 по 1998 год (Roy, Sparks, 2000). Также данные проекта Nature's Calendar (<https://naturescalendar.woodlandtrust.org.uk>) показывают, что шмели на о. Великобритания в целом стали вылетать весной раньше на 2 недели с 2001 по 2007 гг., что, вероятно, вызвано повышением температуры почв – именно их повышение прерывает диапаузу маток (Hegland, 2009).

Последствия расхождения фенологических сроков растения и опылителя. Следует учитывать, что проявление этих последствий во многом зависит от структуры сообществ. Среди насекомых-опылителей много видов-полифагов, и специализированные взаимоотношения растение-опылитель встречаются редко (Waser et al., 1996). Эта особенность взаимоотношений опылителей и растений гарантирует достаточную устойчивость их популяций к изменениям климата. Также большинство взаимодействий опылителей и растений очень асимметричны. Это означает, что если опылитель специализируется на данном виде растений (высокий процент посещений данного вида растений), то важность этого вида опылителя для данного вида растения низка (низкий про-

цент от общего числа посещений опылителей). И наоборот, растения, опыляемые малым числом видов (обычно универсальных), не являются важным источником питания для этих видов опылителей (Bascompte et al., 2006; Bascompte et al., 2003).

Возможны различные варианты последствий фенологических сдвигов в паре растение-опылитель. Часть моделей показывает, что глобальное потепление может вызвать перебои в питании от 17% до 50% всех видов опылителей в результате расхождения сроков цветения и периода лёта, такая большая разница в выводах возникает из-за трудности сопоставления реакций насекомых-опылителей и опыляемых растений на изменения. В первую очередь пострадают специализированные опылители, которые могут полностью лишиться источника питания. Однако и у универсальных опылителей также может наблюдаться значительное сокращение источников питания (Memmott et al., 2007). Например, для колибри сопутствующие источники пищи определяют его репродуктивный успех, и рассогласование фенологических циклов способно резко сократить число потомков (Waser, 1976). Следует также учитывать, что показатели посещаемости не всегда определяют качество опыления. Как правило специализированные опылители имеют более высокий процент успешного опыления цветов по сравнению с универсальными видами, посещающими тот же вид растения. Это еще более осложняет определение возможных последствий фенологических расхождений. Соответственно, изменения в сообществах за счёт выпадения специализированных видов имеют конкретную выраженность в успешности завязки семян и качестве плодов сельскохозяйственных растений (Vasiliev, Greenwood, 2020). Также имеет значение дальность полёта опылителей (соответственно и дальность переноса пыльцы), так как эти параметры обеспечивают генетическое разнообразие в метапопуляциях растений, что также влияет на качество урожая, в том числе и сельскохозяйственных культур (Pasquet et al., 2008). Следует учитывать и временную комплементарность, так как временное разделение ниш наблюдается как у опылителей, так и растений (Hoehn et al., 2008; Rader et al., 2016). Было обнаружено, что ночные виды *Lepidoptera* (например, представители из семейства *Sphingidae*) играют важную роль в опылении сельскохозяйственных культур (таких, как виды рода *Lonicera* или *Nicotiana*), дополняя активность дневных опылителей (Vasiliev, Greenwood, 2020).

Таким образом, несмотря на то, что только около 2% мировой фауны надсемейства *Apoidea* вносят значительный вклад в опыление сельскохозяйственных культур за счёт своего обилия и распространённости (Klein et al., 2007), локальное разнообразие опылителей также способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур (Vasiliev, Greenwood, 2020), а фенологические сдвиги являются угрозой для этой функции.

В исследовании японских учёных (Kudo, Ida, 2013) было установлено, что раннецветущие растения в Японии стали цвести раньше срока под воздействием тёплой весны. Но температура воздуха не влияет на появление маток шмелей *Bombus*, появляющихся позже, что приводит к уменьшению ими успешного опыления растений (Kudo, Ida, 2013).

Таким образом, последствиями расхождения фенологических сроков цветения растений и лёта опылителей могут быть как уменьшение кормовой базы опылителей, так и снижение успешности опыления растений и, как следствие, снижение эффективности плодоношения. Самым пока непредсказуемым последствием расхождения фенологических сроков растений и опылителей является каскадный эффект, который может проявиться позже, в течение вегетационного сезона, отражаясь на последующих взаимосвязях организмов. Колебания численности популяций ранних опылителей могут повлиять на поздноцветущие виды, а впоследствии на состояние популяций поздних опылителей (Waser, Real 1979).

Смещение ареалов. Известно, что изменение климата приводит к смещению границ ареалов биологических видов по широте в более северные регионы и высоте в горах (влияет не только изменение температуры, но и влажности). Результат сказывается и на системах растение-опылитель. Для горных экосистем отмечены тенденции сокращения ареалов высокогорных видов (Parmesan, 2006). В то же время среднегорные растения постепенно распространяют свой ареал на большие высоты (Kelly, Goulden, 2008). Например, ареалы доминирующих горных видов растений в Южной Калифорнии за 30 лет (1977-2007) продвинулись вверх по склону в среднем на 65 м.

Разрушение связи опылитель-цветок в результате несоответствия ареалов было показано для двух греческих эндемичных орхидей *Ophrys argolica* и *Ophrys delphinensis* в отношении потенциального распространения их уникального опылителя *Anthophora plagiata*. Результаты показали, что под воздействием климатических изменений ареалы *O. argolica*, *O. delphinensis* и *A. plagiata* сильно сокращаются за счёт разрыва отношений растение-опылитель. Результаты прогнозов (для двух сценариев изменения климата и трех моделей) показали, что к 2070 году *O. argolica* сохранится только в определенных районах южной Греции, а *O. delphinensis* – исчезнет (Tsiftsis, Djordjević, 2020).

Долгосрочные наблюдения в Европе и Северной Америке показали, что ареалы видов *Bombus* не демонстрируют смещения к северу при потеплении, но теряют южные части ареалов. Это приводит к пространственному разделению растений и их опылителей и нарушению взаимодействий растение-опылитель (Marshman, 2019). Прогнозируется также, что в целом к концу столетия из-за аналогичного нарушения новые взаимодействия растение-опылитель в Европе будут составлять почти половину от всех имеющихся (Morton, Rafferty, 2017).

Хищники и паразиты. Негативные последствия для опылителей могут наступать также вследствие обусловленного изменениями климата появления новых хищников и паразитов.

Потепление климата может создать условия для инвазий опасных для опылителей хищников (таких, как: *Philanthus triangulum*, *Vespula germanica*, *Vespa mandarinia*). Так, азиатский гигантский шершень (*V. mandarinia*), обитающий в Индомалайском регионе, является охотником на представителей семейства *Apidae*, включая и одомашненных медоносных пчел. В 2019 г. шершни были

обнаружены в Британской Колумбии, а в 2020 г. уже в штате Вашингтон, что свидетельствует об успешной зимовке данного вида. По оценкам климатического ареала этот вид способен распространиться по тихоокеанскому северо-западу США и большей части восточной части Северной Америки. В дальнейшем при развитии климатических изменений ареал способен ещё более расшириться. При этом данные районы являются центром производства меда, а также являются центрами видового разнообразия американских представителей рода *Bombus*. Таким образом, вселение шершней способно нанести большой экономический и экологический урон (Nuñez-Penichet et al., 2020).

Постепенное повышение средних температур может привести к приобретению опылителями, в особенности культурными, новых паразитов. Например, клещ *Tropilaelaps* spp. еще не заражает *Apis mellifera* на территориях, где их цикл развития включает репродуктивную диапаузу, при которой клещ не может паразитировать на личинках, так как он не способен прокусывать покровы взрослых особей. Однако, если изменения климата будут вызывать более теплые зимы, популяции *A. mellifera* будут переходить к непрерывному репродуктивному циклу, что сделает их уязвимыми для видов *Troilaelaps* (Le Conte, Navajas, 2008).

Осадки. Для взаимодействий растение-опылитель важен не только температурный режим, но и режим осадков и, в целом, состояние увлажнения. Изменение режима осадков в различных регионах может вызывать перестройки в сообществах опылителей. Например, двукрылые становятся более многочисленными в более холодных и влажных районах, тогда как перепончатокрылые более многочисленны в более теплых и сухих местах обитания, так как их активность в пасмурные дни сильно снижена. Однако моделирование взаимных сдвигов ареалов насекомых-опылителей и растений на восьми различных участках Патагонии, для которых были описаны сети отношений растение-опылитель, обусловленных изменениями по градиенту осадков, обнаружило, что в результате миграции опылителей вымрет относительно небольшое количество видов растений, системы растения-опылители демонстрируют устойчивость к изменениям режима осадков (Devoto et al., 2007).

Влияние засух на опылителей также может быть прямым и косвенным. Прямое воздействие выражается в недостатке влаги для личинок и имаго насекомых-опылителей. Например, подвид *Apis mellifera sahariensis* встречающийся в оазисах Сахары, приспособился к сбору нектара с цветов пальм и экстремальным температурам. Основным лимитирующим фактором выживания этого подвида является запас воды, в засушливой среде пустынные цветы не могут обеспечить особей достаточным количеством влаги, поэтому наличие в окрестностях открытых водоёмов для них жизненно важно (Le Conte, Navajas, 2008). В то же время в условиях засушливых почв встречается гораздо меньшее число видов двукрылых опылителей, так как их личинки предпочитают влажные субстраты.

Косвенное влияние засух в основном выражается в сокращении источников пищи для насекомых-опылителей. Чрезмерно засушливый климат снижает производство пыльцы и ухудшает ее питательные качества, что

отрицательно сказывается на опылителях (Stokstad, 2007). Кроме того, чрезмерно сухой климат снижает производство цветочного нектара. Например, цветы лаванды не дают нектара в сухую погоду, что может вызвать голодание опылителей на полях (Le Conte, Navajas, 2008) и даже их гибель.

Неблагоприятные погодно-климатические явления. Помимо перечисленных выше факторов существуют непосредственные угрозы физического уничтожения животных-опылителей. Ураганы, пожары, наводнения и пыльные бури, волны жары и холода, возвратные заморозки и ранние оттепели способны снизить численность диких и одомашненных опылителей. По данным наблюдений, на территории России количество опасных гидрометеорологических явлений, из которых большинство влияют негативно на опылителей, увеличилось по сравнению с началом века (Доклад об особенностях..., 2021; рис. 4).

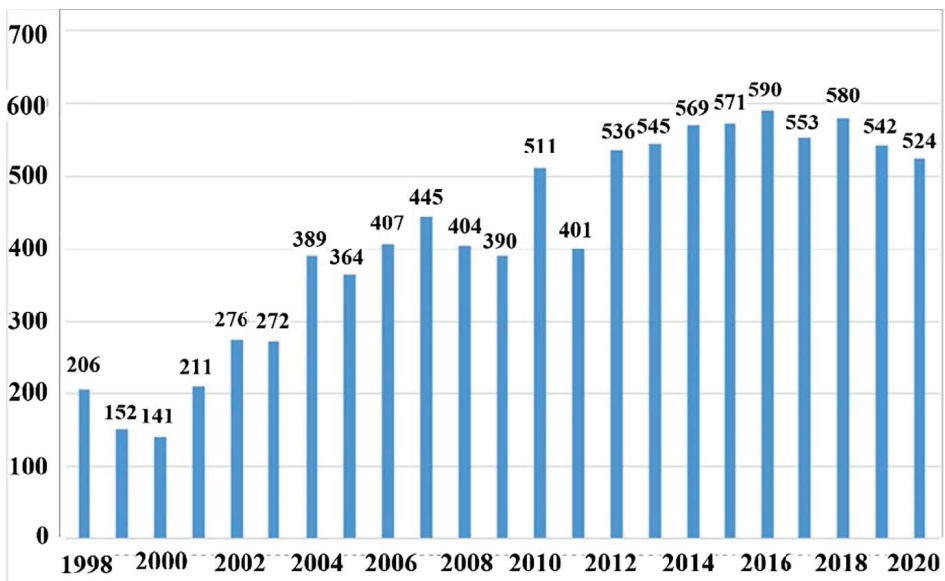


Рисунок 4. Распределение гидрометеорологических ОЯ по годам
(Доклад об особенностях..., 2021)

Figure 4. Distribution of hydrometeorological ODS by year
(Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2020)

Например, в 2007 г. в Московской области наблюдалось резкое снижение численности шмелей на исследованных площадках, вероятной причиной могли быть погодные аномалии зимы 2006-2007 гг., которая характеризовалась ранними длительными оттепелями. Это привело к нарушению протекания зимней диапаузы и процесса холодовой реактивации, что вызвало значительную гибель шмелей во время зимовки (Ясюкевич и др., 2013). Последующие за этим сильные заморозки могли усугубить сложившуюся ситуацию.

Засухи в основном влияют на кормовую базу опылителей. В России в результате катастрофических засух 2010 года произошло усыхание растений,

что существенно подорвало кормовую базу насекомых-опылителей, в частности шмелей. Отметим, что на территории Подмосковья у большей части видов шмелей в начале августа происходит развитие следующего поколения самцов и самок. Последние после небольшого периода питания уходят на зимовку. Скудность кормовой базы 2010 года привела к тому, что шмелей-основательниц следующего поколения выросло мало. Поэтому в 2011 г. наблюдалось снижение разнообразия шмелей и их численности на исследованных участках территории Подмосковья (Ясюкевич и др., 2011). В последующие благоприятные годы биоразнообразии шмелей вновь восстановилось.

В некоторых регионах в результате изменений климата происходит учащение таких явлений, как дожди, заморозки или сильных ветров. Длительные туманы и дожди снижают лётную активность многих опылителей (в частности представителей семейства *Apidae*), что в сочетании с другими климатическими факторами снижает эффективность питания. А сильные ветра в сочетании с морозами усиливают выхолаживающий эффект, что опасно для опылителей, зимующих над поверхностью почвы, в частности для одомашненных пчёл.

К наиболее опасным явлениям для насекомых-опылителей относятся пожары. Погодные условия создают предпосылки (высыхание почвы, растительности), тогда как источник возгорания в большинстве случаев является антропогенным. Пожары, как лесные, так и степные, способны снижать разнообразие насекомых-опылителей на несколько лет. Ситуация усугубляется тем, что степные и другие травяные пожары часто вызываются искусственно, в виду их «безопасности». Также важна сезонность пожаров. Например, степные опылители (в особенности представители семейства *Tenthredinidae* и надсемейства *Apoidea*) наиболее уязвимы при поздних весенних и осенних пожарах, когда из-за сухости прогорают луга, болота, заросли ивняка. При этом вместе с сухими растениями, подстилкой и ветошью сгорают гнезда как одиночных пчел в полых стеблях растений и древесине, так и шмелей в скоплениях сухой травы и кочках, в том числе и их подземные гнезда. Насекомые наиболее уязвимы к осенним пожарам до выпадения снега, так как происходит полная элиминация личинок и зимующих имаго и новые опылители мигрируют при весеннем расселении с соседних участков (Игнатенко, Игнатенко, 2010).

Для домашней медоносной пчелы, как наиболее самого изученного вида насекомых-опылителей, известно больше случаев влияния неблагоприятных погодных явлений. Например, ветер в сочетании с низкими температурами ускоряет остывание улья, что может приводить к гибели части колонии. Повышенная влажность, сопутствующая туманам и затяжным дождям, снижает устойчивость отдельных особей *A. mellifera* к экстремальным температурам. Многочисленные примеры описаны в литературе по пчеловодству.

Таким образом, можно сделать вывод, что на сегодняшний момент безусловно имеются данные, подтверждающие наличие вклада климатических изменений в развитие кризиса опылителей (табл. 1), однако их проявления на данный момент теряются на фоне всех остальных факторов, таких, как фрагментация ландшафта или интенсификация сельского хозяйства.

Таблица 1. Число научных работ, посвящённых факторам воздействия климата на кризис опыления

Table 1. Number of scientific works devoted to the factors of climate impact on the pollination crisis

Климатические факторы кризиса опыления	Число научных работ, посвящённых им
Прямое воздействие изменений температуры	11
Изменение фенологии растений	10
Изменение фенологии опылителей	5
Расхождения фенологических сроков растений и опылителей	8
Климатическое смещение ареалов	5
Уровень содержания CO ₂ в атмосфере	1
Изменения режима осадков	3
Неблагоприятные погодно-климатические явления	3
Хищники и паразиты	2
Всего рассмотрено работ	37

Обсуждение: последствия кризиса опыления в сельском хозяйстве

Массовые гибели домашней медоносной пчёлы уже сказываются на производстве мёда и высоких расходах на искусственное восполнение популяций (Мадебейкин, 2004). Случившаяся в Айове в 2006 г. гибель 70% популяций медоносной пчёлы вызвала сокращение производства мёда почти вдвое (Nagorian, 2017). Аналогично из-за непредсказуемой погоды в Италии производство мёда в некоторые годы сокращается почти вдвое по сравнению с предыдущими годами (Mutinelli et al., 2010).

На данный момент отсутствуют подтверждения того, что кризис опыления приводит к снижению производства сельскохозяйственной продукции. Массовые потери культурных опылителей в Европе и США также еще не привели к подтвержденному снижению продуктивности культур, зависящих от опылителей (Aizen, Harder, 2009). В то же время опубликованы отдельные сообщения о дефиците опылителей в отдельных регионах, рассчитываемые из площадей посевов сельскохозяйственных культур (Мадебейкин, 2004; Ченикалова, Черкашин, 2019).

Некоторые авторы (Breeze et al., 2011; Winfree et al., 2007) предполагают, что биоразнообразие диких опылителей во многом снижает последствия гибели домашних опылителей от массовых болезней и гидрометеорологических явлений. Наличие в экосистемах видов с разной фенологией и скоростью приспособления в большинстве случаев компенсирует разрыв в фенологических датах с цветущими растениями (Tylianakis et al., 2008). В частности, высокое биоразнообразие способствует фенологической синхронизации циклов развития опылителей в целом с периодами цветения сельскохозяйственных культур (Forrest, 2015; Bartomeus et al., 2013; Vasiliev, Greenwood, 2020). Однако тренд к сокращению численности диких опылителей и массовая гибель домашних в определенные неблагоприятные сезоны и позволяют

предположить, что в ближайшие десятилетия дикие опылители уже не смогут компенсировать отсутствие домашних опылителей, что приведет и подрыву данной экосистемной услуги, необходимой для сельского хозяйства.

Т.к. зависящие от опылителей растения содержат более 90% витамина С, 100% ликопина и почти полное количество антиоксидантов б-криптоксантина и б-токоферола, большую часть липидов (74%), витамина А (> 70%) и родственных каротиноидов (98%), кальция (58%) и фторидов (62%), а также большую часть фолиевой кислоты (55%) нашего рациона, то снижение эффективности опыления и нехватка продукции опыляемых растений может привести к значительному увеличению числа заболеваний, связанных с рационом питания, которые можно было бы предотвратить, особенно в районах, уже уязвимых к дефициту питательных веществ (Vasiliev, Greenwood, 2020).

Многие страны мира приняли или намереваются внедрить национальные стратегии сохранения опылителей как ответ на кризис опыления. Решения заинтересованных сторон (бенефициаров аграрного производства) часто основываются на прагматических соображениях, а не на сохранении биоразнообразия как такового. Поэтому все вводимые программы неоднородны по своей сути, в большинстве инициатив направлены исключительно на защиту *A. mellifera*, и лишь немногие – на защиту всех опылителей (Underwood et al., 2017; Senapathi et al., 2015; Vasiliev, Greenwood, 2020).

Для одомашненных видов пчёл методы защиты более разработаны. Основной мерой сохранения культуры медоносных пчёл является сохранение их внутривидового разнообразия. Необходимо сохранить существующие на данный момент подвиды, приспособленные к разным условиям. Например, *Apis mellifera sahariensis* не смогут распространиться за пределы Сахары самостоятельно за счёт изолированности оазисов, что при прогрессировании опустынивания может привести к их гибели. Поэтому необходимо предусмотреть меры по сохранению данного ценного экотипа (Le Conte, Navajas, 2008).

Меры для смягчения кризиса опыления

Так как изменения климата и их последствия усугубляют сокращение численности опылителей, необходимо предпринимать меры их защиты.

В пчеловодстве уже разработаны приемы защиты пчел от гидрометеорологических явлений, а также выведены породы, подходящие для разных типов климата, но сдвиг природно-климатических зон является новым вызовом, т.к. изменяет степень пригодности территории для пчеловодства в целом. Пчеловодам необходимо будет подбирать нужные породы под происходящие климатические изменения. Это означает, что должны быть предусмотрены меры по сохранению экотипов пчёл, чтобы не утратить и использовать их в соседних регионах. Возможный метод решения этой проблемы – криоконсервация спермы (Le Conte, Navajas, 2008).

Возможно также вводить в культуру новые виды опылителей-специалистов, для опыления определённых сельскохозяйственных культур. Например, некоторые виды семейства Apidae проводят «базз-опыление», которое позво-

ляет им эффективнее извлекать пыльцу из цветов, например, черники, клюквы, киви, перца чили, баклажанов и помидоров. Это характерно в особенности для представителей рода *Bombus*. К тому же *A. mellifera* не обладает этой способностью и, как было показано, является плохим опылителем этих продовольственных культур (Vasiliev, Greenwood, 2020).

Для предотвращения расхождения фенологических сроков возможно использование привозных видов растений или селективных сортов растений. В регионах с умеренным климатом многие неместные растения происходят из более теплых районов и проявляют высокую устойчивость к широкому спектру климатических условий, а также имеют отличное от местных видов время цветения; следовательно, они могут восполнить недостающее питание местным видам насекомых-опылителей (Decourtye, 2019; Winfree, 2010; Brown, Paxton, 2009). Также возможно использовать растения, которые могут цвести несколько раз в течение летнего периода. Однако в этом случае можно столкнуться с проблемами сопутствующих интродукции видов.

В случае неблагоприятных погодных явлений важную роль играет качество среды: наличие подходящих местообитаний (в том числе временных укрытий) и пищи (чтобы быстро скомпенсировать временное ее отсутствие). Чтобы поддержать популяции диких опылителей, целесообразно оптимизировать агроландшафты и севообороты (Ченикалова, Черкашин, 2019). Также необходимо поддержание сети связанных ООПТ, сохраняющих естественную растительность и предоставляющих места для гнездования опылителей.

В целом для предупреждения возможных проблем с опылением в будущем необходимо активно изучать особенности насекомых-опылителей и их значимость для сельскохозяйственных культур, разработать программы селекции культур для увеличения их питательной ценности для опылителей (Decourtye, 2019; Winfree, 2010).

Требуется изучения и принятия решений принципиальный вопрос: при нарастающих изменениях климата будут ли адекватно работать меры, предложенные выше?

Заключение

Кризис опыления подтверждается данными для таких регионов, как Северная Америка и Западная Европа, но нуждается в дополнительных исследованиях по систематическим группам и регионам.

Регулярно отмечаются случаи массовой гибели домашних медоносных пчел. Вместе с тем, прямые антропогенные эффекты в настоящее время рассматриваются как главная причина сокращения численности и разнообразия диких опылителей, тогда как изменения климата – как потенциальное, за исключением опасных гидрометеорологических явлений.

Уже собранные данные доказывают существование влияния изменений климата на разные группы опылителей, выделены негативные эффекты и охарактеризованы примеры естественной адаптации.

В научной литературе появляется все больше моделей, говорящих о вероятном сокращении численности и популяций диких опылителей в некоторых регионах в связи с климатообусловленными процессами в будущем.

Случаи массовой гибели домашних пчел, в том числе из-за неблагоприятных погодных явлений, до определенной степени они могут быть снижены за счет имеющихся в пчеловодстве наработок, в том числе и подходящими для адаптации к изменениям климата.

Предпринимаются регулярные попытки поддержания популяций диких опылителей, однако необходимы дополнительные исследования как самих видов, так и возможных методов по их сохранению в свете изменений климата.

На данный момент необходим интенсивный сбор эмпирических данных о флуктуациях численности опылителей, о реакциях на изменения средних климатических показателей на различных объектах в условиях различных территорий. При этом желательна организация постоянного мониторинга избранных популяций диких опылителей. Результатом будет получение необходимого массива данных для однозначного определения серьезности проблемы кризиса опыления и её климатической составляющей.

Кризис процесса опыления представляется в перспективе вполне реальной угрозой, усугубляемой усилением изменений климата.

Список литературы

Винобер, А.В. (2019) Причины массовой гибели пчел или как избежать коллапса в российском пчеловодстве, *Научно-практический журнал Биосферное хозяйство: теория и практика*, с. 22.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014) М., Росгидромет, 1009 с.

Глухов, М.М. (1955) *Медоносные растения*, М., Сельхозгиздат, 304 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год (2021) М., Росгидромет, 104 с.

Игнатенко, Е.В., Игнатенко, С.Ю. (2010) Влияние низовых пожаров на пчел (Hymenoptera: Apoidea) в Хинганском заповеднике, Амурская область, *Амурский зоологический журнал*, т. 2, № 4, с. 341-347.

Лопатин, А.В., Солдатова, Н.В., Вилкова, Н.А. (2007) Фуражировочная активность шмелей и пчел при опылении огурца в теплицах, *Пчеловодство*, № 9, с. 56-57.

Мадебейкин, И.И. (2004) *Фауна и биоэкология шмелей агроценозов северо-восточной части Приволжской возвышенности*, Автореф. дисс. канд. биол. наук., М., Рос. гос. аграрн. заочн. ун., 20 с.

Мальшев, С.И. (1963) *Дикие опылители на службе у человека*, М., Л., Наука, 68 с.

Мариковская, Т.П. (1982) *Пчелиные – опылители сельскохозяйственных культур*, Алма-Ата, Наука, КазССР, 115 с.

Мусолин, Д.Л., Саулич, А.Х. (2012) Реакции насекомых на современное изменение климата: от физиологии и поведения до смещения ареалов, *Энтомологическое обозрение*, т. 91, № 1, с. 3-35.

Соловьева, Л.Ф. (2012) Защитить пчел от отравления пестицидами, *Защита и карантин растений*, № 5, с. 53-54.

Нурлыгаянов, Р.Б., Исмагилов, К.Р., Камалетдинова, А.А., Карома, И.А. (2019) Гибель пчел от пестицидов на рапсовых полях: кто виноват и что делать? *Современный фермер*, № 10, с. 8-10.

Ченикалова, Е.В., Черкашин, В.Н. (2019) Пути повышения эффективности природных опылителей при органическом земледелии, *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, № 8, с. 25-29.

Ясюкевич, В.В., Давидович, Е.А., Ясюкевич, Н.В. (2011) Об отдаленных последствиях блокирующего антициклона лета 2010 г. для шмелей Московского региона, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, М., ИГКЭ, т. 24, с. 401-410.

Ясюкевич, В.В., Ривкин, Л.Е., Ясюкевич, Н.В. (2013) Влияние погодных аномалий и процессов урбанизации на состояние популяции биоразнообразие шмелей в Московском регионе: преодоление биологических последствий аномального лета 2010 г., *Прикладная энтомология*, т. 4, № 2, с. 30-41.

Abrol, D.P. (2009) Plant-pollinator interactions in the context of climate change-an endangered mutualism, *Journal of Palynology*, vol. 45, pp. 1-25.

Aizen, M.A., Harder, L.D. (2009) The global stock of domesticated honey bees is growing slower than agricultural demand for pollination, *Current biology*, vol. 19, no. 11, pp. 915-918.

Ackerman, J.D. (2000) Abiotic pollen and pollination: ecological, functional, and evolutionary perspectives, *Pollen and Pollination*, Springer, Vienna, pp. 167-185.

Bartomeus, I., Park, M.G., Gibbs, J., Danforth, B.N., Lakso, A.N., Winfree, R. (2013) Biodiversity ensures plant-pollinator phenological synchrony against climate change, *Ecology letters*, vol. 16, no. 11, pp. 1331-1338.

Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C.J., Olesen, J.M. (2003) The nested assembly of plant-animal mutualistic networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 100, no. 16, pp. 9383-9387.

Bascompte, J., Jordano, P., Olesen, J.M. (2006) Asymmetric coevolutionary networks facilitate biodiversity maintenance, *Science*, vol. 312, no. 5772, pp. 431-433.

Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P., Reemer, M., Ohlemüller, R., Edwards, M., Peeters, T., Settele, J. (2006) Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands, *Science*, vol. 313, no. 5785, pp. 351-354.

Breeze, T.D., Bailey, A.P., Balcombe, K.G., Potts, S.G. (2011) Pollination services in the UK: How important are honeybees? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 142, no. 3-4, pp. 137-143.

Brown, M.J.F., Paxton, R.J. (2009) The conservation of bees: a global perspective, *Apidologie*, vol. 40, no. 3, pp. 410-416.

Decourtye, A., Alaux, C., Le Conte, Y., Henry, M. (2019) Toward the protection of bees and pollination under global change: present and future perspectives in a challenging applied science, *Current opinion in insect science*, vol. 35, pp. 123-131.

Devoto, M., Zimmermann, M., Medan, D.M. (2007) Robustness of plant-flower visitor webs to simulated climate change, *Ecología Austral.*, vol. 17, Issue 1, pp. 37-50.

Dirzo, R., Young, H.S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N.J., Collen B. (2014) Defaunation in the Anthropocene, *Science*, vol. 345, no. 6195, pp. 401-406.

Dormann, C.F., Márquez, J.R.G., Lautenbach, S., Schröder, B. (2008) Components of uncertainty in species distribution analysis: a case study of the great grey shrike, *Ecology*, vol. 89, no. 12, pp 3371-3386.

Doyle, T., Hawkes, W.L., Massy, R., Powney, G.D., Menz, M.H., Wotton, K.R. (2020) Pollination by hoverflies in the Anthropocene, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 287, no. 1927, pp. 20200508, doi: 10.1098/rspb.2020.0508.

Dunne, J.A., Harte, J., Taylor, K.J. (2003) Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods, *Ecological Monographs*, vol. 73, no. 1, pp. 69-86.

Fitter, A.H., Fitter, R.S.R. (2002) Rapid changes in flowering time in British plants, *Science*, vol. 296, no. 5573, pp. 1689-1691.

Forrest, J.R.K. (2015) Plant-pollinator interactions and phenological change: what can we learn about climate impacts from experiments and observations? *Oikos*, vol. 124, no. 1. pp. 4-13.

Gallai, N., Salles, J.M., Settele, J., Vaissi, B.E. (2009) Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline, *Ecological Economics*, vol. 68, issue 3, pp. 810-821.

Ghazoul, J. (2005) Buzziness as usual? Questioning the global pollination crisis, *Trends in ecology and evolution*, vol. 20, no. 7, pp. 367-373.

González-Varo, J.P. Biesmeijer, J.C., Bommarco, R., Potts, S.G., Schweiger, O., Smith, H.G., Steffan-Dewenter, I., Szentgyörgyi, H., Woyciechowski, M., Vilà, M. (2013) Combined effects of global change pressures on animal-mediated pollination, *Trends in ecology and evolution*, vol. 28, no. 9, pp. 524-530.

Gordo, O., Sanz, J.J. (2006) Temporal trends in phenology of the honey bee *Apis mellifera* (L.) and the small white *Pieris rapae* (L.) in the Iberian Peninsula (1952-2004), *Ecological Entomology*, vol. 31, no. 3, pp. 261-268.

Hahn, M., Brühl, C.A. (2016) The secret pollinators: an overview of moth pollination with a focus on Europe and North America, *Arthropod-Plant Interactions*, vol. 10, no. 1. pp. 21-28.

Hallmann, C.A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Goulson, D. (2017) More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas, *PLoS one*, vol. 12, no. 10, e0185809, doi: 10.1371/journal.pone.0185809.

Hagopian, J. (2017) *Death and Extinction of the Bees*, Global Research, March, 24.

Hegland, S.J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjercknes, A.L., Totland, Ø. (2009) How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology letters*, vol. 12, no. 2, pp. 184-195.

Hoehn, P., Tscharrntke, T., Tylianakis, J.M., Steffan-Dewenter, I. (2008) Functional group diversity of bee pollinators increases crop yield, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 275, no. 1648, pp. 2283-2291.

Hoffmann, A.A., Hallas, R.J., Dean, J.A., Schiffer, M. (2003) Low potential for climatic stress adaptation in a rainforest *Drosophila* species, *Science*, vol. 301, no. 5629, pp. 100-102.

Hoover, S.E.R. et al. (2012) Warming, CO₂, and nitrogen deposition interactively affect a plant-pollinator mutualism, *Ecology Letters*, vol. 15, no. 3, pp. 227-234.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC (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, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.).

Jauker, F., Wolters, V. (2008) Hover flies are efficient pollinators of oilseed rape, *Oecologia*, vol. 156, no. 4, Article number: 819, available at: <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1034-x>.

Kearns, C.A., Inouye, D.W., Waser, N.M. (1998) Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions, *Annual review of ecology and systematics*, vol. 29, no. 1, pp. 83-112.

Kelly, A.E., Goulden, M.L. (2008) Rapid shifts in plant distribution with recent climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 33, pp. 11823-11826.

Kjohl, M., Nielson, A., Stenseth, N.C. (2011) *Potential effects of climate change on crop pollination*, FAO, Rome, available at: <http://www.fao.org/3/i2242e/i2242e.pdf>.

Klein, A.M., Vaissiere, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tscharntke, T. (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops, *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, vol. 274, no. 1608, pp. 303-313.

Kluser, S., Peduzzi, P. (2007) *Global pollinator decline: a literature review*, UNEP/DEWA/GRID-Europe 11, Ch. Des Anémones 1219 Châtelaine, Geneva, Switzerland, available at: <https://studyres.com/doc/15170602/global-pollinator-decline--a-literature-review---grid>.

Kudo, G., Ida, T.Y. (2013) Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators, *Ecology*, vol. 94, no. 10, pp. 2311-2320.

Le Conte, Y., Navajas, M. (2008) Climate change: impact on honey bee populations and diseases, *Revue Scientifique et Technique-Office International des Epizooties*, vol. 27, no. 2, pp. 499-510.

Mattila, H.R., Otis, G.W. (2006) Influence of pollen diet in spring on development of honey bee (Hymenoptera:Apidae) colonies, *Journal of Economic Entomology*, vol. 99, no. 3, pp. 604-613.

Marshman, J., Blay-Palmer, A., Landman, K. (2019) Anthropocene Crisis: Climate Change, Pollinators, and Food Security, *Environments*, vol. 6, issue 2, p. 22, available at: <https://doi.org/10.3390/environments6020022>.

Memmott, J., Craze, P.G., Waser, N.M., Price, M.V. (2007) Global warming and the disruption of plant-pollinator interactions, *Ecological Letters*, vol. 10, pp. 710-717.

Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Chmielewski, F.M. (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern, *Global change biology*, vol. 12, no. 10, pp. 1969-1976.

Miller-Rushing, A.J., Katsuki, T., Primack, R.B., Ishii, Y., Lee, S.D., Higuchi, H. 2007. Impact of global warming on a group of related species and their hybrids: cherry tree (Rosaceae) flowering at Mt. Takao, Japan, – *American Journal of Botany*, vol. 94, no. 9, pp. 1470-1478.

Molnár, A., Tökölyi, J., Végvári, Z., Sramkó, G., Sulyok, J., Barta, Z. (2012) Pollination mode predicts phenological response to climate change in terrestrial orchids: a case study from central Europe, *Journal of Ecology*, vol. 100, no. 5, pp.1141-1152.

Morton, E.M., Rafferty, N.E. (2017) Plant–pollinator interactions under climate change: The use of spatial and temporal transplants, *Applications in plant sciences*, vol. 5, no. 6, apps. 1600133, doi: 10.3732/apps.1600133.

Mutinelli, F. et al. (2010) Honey bee colony losses in Italy, *Journal of Apicultural Research*, vol. 49, no. 1, pp. 119-120.

Núñez-Penichet, C., Osorio-Olvera, L., Gonzalez, V.H., Cobos, M.E., Jimenez, L., DeRaad, D.A., Ashraf, U., Adebaje, A., Peterson, A.T., Soberón, J. (2020) *Geographic potential of the world largest hornet, Vespa mandarinia Smith (Hymenoptera: Vespidae), worldwide and particularly in North America, BioRxiv*, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.08.11.246991>, available at: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.08.11.246991v1.external-links.html>.

Ollerton, J., Winfree, R., Tarrant, S. (2011) How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, vol. 120, no. 3, pp. 321-326.

Orford, K.A., Vaughan, I.P., Memmott, J. (2015) The forgotten flies: the importance of non-syrphid Diptera as pollinators, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 282, no. 1805, doi: 10.1098/rspb.2014.2934.

Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, vol. 37, pp. 637-669.

Pasquet, R.S., Peltier, A., Hufford, M.B., Oudin, E., Saulnier, J., Paul, L., Gepts, P. (2008) Long-distance pollen flow assessment through evaluation of pollinator foraging range suggests transgene escape distances, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 36, pp. 13456-13461.

Pellegrino, G., Mahmoudi, M., Palermo, A.M. (2020) Pollen viability of EuroMediterranean orchids under different storage conditions: The possible effects of climate change, *Plant Biology*, vol. 23, no. 1, pp. 140-147, doi: 10.1111/plb.13185.

Pievani, T. (2014) The sixth mass extinction: Anthropocene and the human impact on biodiversity, *Rendiconti Lincei*, vol. 25, no. 1, pp. 85-93.

Potts, S.G., Jacobus, C.B., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Williams, E.K. (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers, *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 25, no. 6, pp. 345-353.

Powney, G.D., Carvell, C., Edwards, M., Morris, R.K., Roy, H.E., Woodcock, B.A., Isaac, N.J. (2019) Widespread losses of pollinating insects in Britain, *Nature communications*, vol. 10, no. 1, pp. 1-6.

Price, M.V., Waser, N.M. (1998) Effects of experimental warming on plant reproductive phenology in a subalpine meadow, *Ecology*, vol. 79, no. 4, pp. 1261-1271.

Rader, R., Bartomeus, I., Garibaldi, L.A., Garratt, M.P., Howlett, B.G., Winfree, R., Bommarco, R. (2016) Non-bee insects are important contributors to global crop pollination, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 1, pp. 146-151.

Reddy, P.V.R., Verghese, A., Sridhar, V., VarunRajan, V. (2012) Plant-pollinator interactions: A highly evolved synchrony at risk due to climate change, *Adaptation and Mitigation Strategies for Climate Resilient Horticulture*, Published by IHR, Bangalore, pp. 274-281.

Reddy, P.V., Verghese, A., Rajan, V.V. (2012) Potential impact of climate change on honeybees (*Apis* spp.) and their pollination services, *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, vol. 18, no. 2, pp. 121-127.

Reddy, P.V.R., Verghese, A., Sridhar, V., Rajan, V.V. (2013) Plant-pollinator interactions: a highly evolved synchrony at risk due to climate change, *Climate-Resilient Horticulture: Adaptation and Mitigation Strategies*, Springer, India, pp. 295-302.

Roy, D.B., Sparks, T.H. (2000) Phenology of British butterflies and climate change, *Global change biology*, vol. 6, no. 4, pp. 407-416.

Rusterholz, H.P., Erhardt, A. (1998) Effects of elevated CO₂ on flowering phenology and nectar production of nectar plants important for butterflies of calcareous grasslands, *Oecologia*, vol. 113, no. 3, pp. 341-349.

Sánchez-Bayo, F., Wyckhuys, K.A.G. (2019) Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers, *Biological conservation*, vol. 232, pp. 8-27, available at: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>.

Seibold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarlı, D., Linsenmair, K.E. (2019) Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers, *Nature*, vol. 574, no. 7780, pp. 671-674.

Senapathi, D., Biesmeijer, J.C., Breeze, T.D., Kleijn, D., Potts, S.G., Carvalho, L.G. (2015) Pollinator conservation – the difference between managing for pollination services and preserving pollinator diversity, *Current Opinion in Insect Science*, vol. 12, pp. 93-101.

Stokstad, E. (2007) The case of the empty hives, *Science*, vol. 316, no. 5827, pp. 970-972.

Tsiftsis, S., Djordjević, V. (2020) Modelling sexually deceptive orchid species distributions under future climates: The importance of plant – pollinator interactions, *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1-12.

Tylianakis, J.M., Didham, R.K., Bascompte, J., Wardle, D.A. (2008) Global change and species interactions in terrestrial ecosystems, *Ecology letters*, vol. 11, no. 12, pp. 1351-1363.

Underwood, E., Darwin, G., Gerritsen, E. (2017) *Pollinator initiatives in EU Member States: Success factors and gaps*, Report for European Commission under contract for provision of technical support related to Target 2 of the EU Biodiversity Strategy to 2020 – maintaining and restoring ecosystems and their services ENV.B.2/SER/2016/0018, Institute for European Environmental Policy, Brussels, 67 p.

Van Asch, M., Van Tienderen, P.H., Holleman, L.J., Visser, M.E. (2007) Predicting adaptation of phenology in response to climate change, an insect herbivore example, *Global Change Biology*, vol. 13, no. 8, pp. 1596-1604.

Van Klink, R., Bowler, D.E., Gongalsky, K.B., Swengel, A.B., Gentile, A., Chase, J.M. (2020) Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances, *Science*, vol. 368, no. 6489, pp. 417-420.

Vasiliev, D., Greenwood, S. (2020) Pollinator biodiversity and crop pollination in temperate ecosystems, implications for national pollinator conservation

strategies: Mini review, *Science of The Total Environment*, vol. 744, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140880.

Wagler, R. (2011) The anthropocene mass extinction: An emerging curriculum theme for science educators, *The American Biology Teacher*, vol. 73, pp. 78-83.

Waser, P.M. (1976) *Cerocebus albigena*: site attachment, avoidance, and intergroup spacing, *The American Naturalist*, vol. 110(976), pp. 911-935.

Waser, N.M., Chittka, L., Price, M.V., Williams, N.M., Ollerton, J. (1996) Generalization in pollination systems, and why it matters, *Ecology*, vol. 77, no. 4, pp. 1043-1060.

Waser, N.M., Real, L.A. (1979) Effective mutualism between sequentially flowering plant species, *Nature*, vol. 281, no. 5733, pp. 670-672.

Winfree, R., Williams, N.M., Dushoff, J., Kremen, C. (2007) Native bees provide insurance against ongoing honey bee losses, *Ecology letters*, vol. 10, no. 11, pp. 1105-1113.

References

Vinober, A.V. (2019) Prichiny massovoj gibeli pchel ili kak izbezhat' kollapsa v rossijskom pchelovodstve [The reasons for the mass death of bees or how to avoid a 'collapse' in Russian beekeeping], *Nauchno-prakticheskij zhurnal Biosfernoe hozyajstvo: teoriya*, p. 22.

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of Rossijskoj Federacii] (2014) Rosgidromet, Moscow, Russia, 1009 p.

Gluhov, M.M. (1955) *Medonosnye rasteniya* [Honey plants], Sel'hozizdat, Moscow, Russia, 304 p.

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2020 god [Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2020] (2021) Rosgidpromet, Moscow, Russia, 104 p.

Ignatenko, E.V., Ignatenko, S.Yu. (2010) Vliyanie nizovyh pozharov na pchel (Hymenoptera: Apoidea) v Hinganskom zapovednike, Amurskaya oblast' [The impact of grassroots fires on bees (Hymenoptera: Apoidea) in the Khingan Nature Reserve, Amur region], *Amurskij zoologicheskij zhurnal*, vol. 2, no. 4, pp. 341-347.

Lopatin, A.V., Soldatova, N.V., Vilkova, N.A. (2007) Furazhirovochnaya aktivnost' shmelej i pchel pri opylenii ogurca v teplicah [Foraging activity of bumblebees and bees during cucumber pollination in greenhouses], *Pchelovodstvo*, no. 9, pp. 56-57.

Madebejkin, I.I. (2004) *Fauna i bioekologiya shmelej agrocenozov severo-vostochnoj chasti Privolzhskoj vozvyshehnosti* [Fauna and bioecology of bumblebees in agrocenoses of the north-eastern part of the Volga upland], Extended

abstract of candidate's thesis, Russian State Agrarian Correspondence University, Moscow, Russia, 20 p.

Malyshev, S.I. (1963) *Dikie opyliteli na sluzhbe u cheloveka* [Wild pollinators in the service of man], Nauka, Moscow, Leningrad, Russia, 68 p.

Marikovskaya, T.P. (1982) *Pchelinye – opyliteli sel'skohozyajstvennykh kul'tur* [Bee pollinators of agricultural crops], Nauka, Alma-Ata, Kazakh SSR, 115 p.

Musolin, D.L., Saulich, A.X. (2012) Reakcii nasekomykh na sovremennoe izmenenie klimata: ot fiziologii i povedeniya do smeshcheniya arealov [Insect responses to modern climate change: from Physiology and Behavior to Habitat Displacement], *Entomologicheskoe obozrenie*, vol. 91, no. 1, pp. 3-35.

Solov'eva, L.F. (2012) Zashchitit' pchel ot otravleniya pesticidami [Protect bees from pesticide poisoning], *Zashchita i karantin rastenij*, no. 5, pp. 53-54.

Nurlygayanov, R.B., Ismagilov, K.R., Kamaletdinova, A.A., Karoma I.A. (2019) Gibel' pchel ot pesticidov na rapsovykh polyah: kto vinovat i chto delat'? [Bee deaths from pesticides in rapeseed fields: who is to blame and what to do?], *Sovremennyj fermer*, no. 10, pp. 8-10.

Chenikalova, E.V., Cherkashin, V.N. (2019) Puti povysheniya effektivnosti prirodnykh opylitelej pri organicheskom zemledelii [Ways to improve the efficiency of natural pollinators in organic farming], *International Journal of Applied and Fundamental Research*, no. 8, pp. 25-29.

Yasyukevich, V.V., Davidovich, E.A., Yasyukevich, N.V. (2011) Ob otdalennykh posledstviyah blokiruyushchego anticiklona leta 2010 g. dlya shmelej Moskovskogo regiona [On the long-term consequences of the blocking anticyclone of the summer of 2010 for bumblebees in the Moscow region], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, IGCE, Moscow, Russia, vol. 24, pp. 401-410.

Yasyukevich, V.V., Rivkin, L.E., Yasyukevich, N.V. (2013) Vliyanie pogodnykh anomalij i processov urbanizacii na sostoyanie populyacii bioraznoobrazie shmelej v Moskovskom regione: preodolenie biologicheskikh posledstvij anomal'nogo leta 2010 g [Influence of weather anomalies and urbanization processes on the state of bumblebee populations and biodiversity in the Moscow region: Overcoming the biological consequences of the anomalous Summer of 2010], *Prikladnaya entomologiya*, vol. 4, no. 2, pp. 30-41.

Abrol, D.P. (2009) Plant-pollinator interactions in the context of climate change-an endangered mutualism, *Journal of Palynology*, vol. 45, pp. 1-25.

Aizen, M.A., Harder, L.D. (2009) The global stock of domesticated honey bees is growing slower than agricultural demand for pollination, *Current biology*, vol. 19, no. 11, pp. 915-918.

Ackerman, J.D. (2000) Abiotic pollen and pollination: ecological, functional, and evolutionary perspectives, *Pollen and Pollination*, Springer, Vienna, pp. 167-185.

Bartomeus, I., Park, M.G., Gibbs, J., Danforth, B.N., Lakso, A.N., Winfree, R. (2013) Biodiversity ensures plant–pollinator phenological synchrony against climate change, *Ecology letters*, vol. 16, no. 11, pp. 1331-1338.

Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C.J., Olesen, J.M. (2003) The nested assembly of plant–animal mutualistic networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 100, no. 16, pp. 9383-9387.

Bascompte, J., Jordano, P., Olesen, J.M. (2006) Asymmetric coevolutionary networks facilitate biodiversity maintenance, *Science*, vol. 312, no. 5772, pp. 431-433.

Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P., Reemer, M., Ohlemüller, R., Edwards, M., Peeters, T., Settele, J. (2006) Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands, *Science*, vol. 313, no. 5785, pp. 351-354.

Breeze, T.D., Bailey, A.P., Balcombe, K.G., Potts, S.G. (2011) Pollination services in the UK: How important are honeybees? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 142, no. 3-4, pp. 137-143.

Brown, M.J.F., Paxton, R.J. (2009) The conservation of bees: a global perspective, *Apidologie*, vol. 40, no. 3, pp. 410-416.

Decourtye, A., Alaux, C., Le Conte, Y., Henry, M. (2019) Toward the protection of bees and pollination under global change: present and future perspectives in a challenging applied science, *Current opinion in insect science*, vol. 35, pp. 123-131.

Devoto, M., Zimmermann, M., Medan, D.M. (2007) Robustness of plant-flower visitor webs to simulated climate change, *Ecología Austral.*, vol. 17, Issue 1, pp. 37-50.

Dirzo, R., Young, H.S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N.J., Collen B. (2014) Defaunation in the Anthropocene, *Science*, vol. 345, no. 6195, pp. 401-406.

Dormann, C.F., Márquez, J.R.G., Lautenbach, S., Schröder, B. (2008) Components of uncertainty in species distribution analysis: a case study of the great grey shrike, *Ecology*, vol. 89, no. 12, pp 3371-3386.

Doyle, T., Hawkes, W.L., Massy, R., Powney, G.D., Menz, M.H., Wotton, K.R. (2020) Pollination by hoverflies in the Anthropocene, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 287, no. 1927, pp. 20200508, doi: 10.1098/rspb.2020.0508.

Dunne, J.A., Harte, J., Taylor, K.J. (2003) Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods, *Ecological Monographs*, vol. 73, no. 1, pp. 69-86.

Fitter, A.H., Fitter, R.S.R. (2002) Rapid changes in flowering time in British plants, *Science*, vol. 296, no. 5573, pp. 1689-1691.

Forrest, J.R.K. (2015) Plant-pollinator interactions and phenological change: what can we learn about climate impacts from experiments and observations? *Oikos*, vol. 124, no. 1. pp. 4-13.

Gallai, N., Salles, J.M., Settele, J., Vaissi, B.E. (2009) Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline, *Ecological Economics*, vol. 68, issue 3, pp. 810-821.

Ghazoul, J. (2005) Buzziness as usual? Questioning the global pollination crisis, *Trends in ecology and evolution*, vol. 20, no. 7, pp. 367-373.

González-Varo, J.P. Biesmeijer, J.C., Bommarco, R., Potts, S.G., Schweiger, O., Smith, H.G., Steffan-Dewenter, I., Szentgyörgyi, H., Woyciechowski, M., Vilà, M. (2013) Combined effects of global change pressures on animal-mediated pollination, *Trends in ecology and evolution*, vol. 28, no. 9, pp. 524-530.

Gordo, O., Sanz, J.J. (2006) Temporal trends in phenology of the honey bee *Apis mellifera* (L.) and the small white *Pieris rapae* (L.) in the Iberian Peninsula (1952-2004), *Ecological Entomology*, vol. 31, no. 3, pp. 261-268.

Hahn, M., Brühl, C.A. (2016) The secret pollinators: an overview of moth pollination with a focus on Europe and North America, *Arthropod-Plant Interactions*, vol. 10, no. 1. pp. 21-28.

Hallmann, C.A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Goulson, D. (2017) More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas, *PloS one*, vol. 12, no. 10, e0185809, doi: 10.1371/journal.pone.0185809.

Hagopian, J. (2017) *Death and Extinction of the Bees*, Global Research, March, 24.

Hegland, S.J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjerknes, A.L., Totland, Ø. (2009) How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology letters*, vol. 12, no. 2, pp. 184-195.

Hoehn, P., Tschardtke, T., Tylianakis, J.M., Steffan-Dewenter, I. (2008) Functional group diversity of bee pollinators increases crop yield, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 275, no. 1648, pp. 2283-2291.

Hoffmann, A.A., Hallas, R.J., Dean, J.A., Schiffer, M. (2003) Low potential for climatic stress adaptation in a rainforest *Drosophila* species, *Science*, vol. 301, no. 5629, pp. 100-102.

Hoover, S.E.R. et al. (2012) Warming, CO₂, and nitrogen deposition interactively affect a plant-pollinator mutualism, *Ecology Letters*, vol. 15, no. 3, pp. 227-234.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC (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, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J.

Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.).

Jauker, F., Wolters, V. (2008) Hover flies are efficient pollinators of oilseed rape, *Oecologia*, vol. 156, no. 4, Article number: 819, available at: <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1034-x>.

Kearns, C.A., Inouye, D.W., Waser, N.M. (1998) Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions, *Annual review of ecology and systematics*, vol. 29, no. 1, pp. 83-112.

Kelly, A.E., Goulden, M.L. (2008) Rapid shifts in plant distribution with recent climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 33, pp. 11823-11826.

Kjohl, M., Nielson, A., Stenseth, N.C. (2011) *Potential effects of climate change on crop pollination*, FAO, Rome, available at: <http://www.fao.org/3/i2242e/i2242e.pdf>.

Klein, A.M., Vaissiere, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tscharntke, T. (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops, *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, vol. 274, no. 1608, pp. 303-313.

Kluser, S., Peduzzi, P. (2007) *Global pollinator decline: a literature review*, UNEP/DEWA/GRID-Europe 11, Ch. Des Anémones 1219 Châtelaine, Geneva, Switzerland, available at: <https://studyres.com/doc/15170602/global-pollinator-decline--a-literature-review---grid>.

Kudo, G., Ida, T.Y. (2013) Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators, *Ecology*, vol. 94, no. 10, pp. 2311-2320.

Le Conte, Y., Navajas, M. (2008) Climate change: impact on honey bee populations and diseases, *Revue Scientifique et Technique-Office International des Epizooties*, vol. 27, no. 2, pp. 499-510.

Mattila, H.R., Otis, G.W. (2006) Influence of pollen diet in spring on development of honey bee (Hymenoptera:Apidae) colonies, *Journal of Economic Entomology*, vol. 99, no. 3, pp. 604-613.

Marshman, J., Blay-Palmer, A., Landman, K. (2019) Anthropocene Crisis: Climate Change, Pollinators, and Food Security, *Environments*, vol, 6, issue 2, p. 22, available at: <https://doi.org/10.3390/environments6020022>.

Memmott, J., Craze, P.G., Waser, N.M., Price, M.V. (2007) Global warming and the disruption of plant-pollinator interactions, *Ecological Letters*, vol. 10, pp. 710-717.

Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Chmielewski, F.M. (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern, *Global change biology*, vol. 12, no. 10, pp. 1969-1976.

Miller-Rushing, A.J., Katsuki, T., Primack, R.B., Ishii, Y., Lee, S.D., Higuchi, H. (2007) Impact of global warming on a group of related species and their hybrids: cherry tree (Rosaceae) flowering at Mt. Takao, Japan, *American Journal of Botany*, vol. 94, no. 9, pp. 1470-1478.

Molnár, A., Tökölyi, J., Végvári, Z., Sramkó, G., Sulyok, J., Barta, Z. (2012) Pollination mode predicts phenological response to climate change in terrestrial orchids: a case study from central Europe, *Journal of Ecology*, vol. 100, no. 5, pp.1141-1152.

Morton, E.M., Rafferty, N.E. (2017) Plant–pollinator interactions under climate change: The use of spatial and temporal transplants, *Applications in plant sciences*, vol. 5, no. 6, apps. 1600133, doi: 10.3732/apps.1600133.

Mutinelli, F. et al. (2010) Honey bee colony losses in Italy, *Journal of Apicultural Research*, vol. 49, no. 1, pp. 119-120.

Núñez-Penichet, C., Osorio-Olvera, L., Gonzalez, V.H., Cobos, M.E., Jimenez, L., DeRaad, D.A., Ashraf, U., Adeboje, A., Peterson, A.T., Soberón, J. (2020) Geographic potential of the world largest hornet, *Vespa mandarinia* Smith (Hymenoptera: Vespidae), worldwide and particularly in North America, *BioRxiv*, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.08.11.246991>, available at: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.08.11.246991v1.external-links.html>.

Ollerton, J., Winfree, R., Tarrant, S. (2011) How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, vol. 120, no. 3, pp. 321-326.

Orford, K.A., Vaughan, I.P., Memmott, J. (2015) The forgotten flies: the importance of non-syrphid Diptera as pollinators, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 282, no. 1805, doi: 10.1098/rspb.2014.2934.

Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, vol. 37, pp. 637-669.

Pasquet, R.S., Peltier, A., Hufford, M.B., Oudin, E., Saulnier, J., Paul, L., Gepts, P. (2008) Long-distance pollen flow assessment through evaluation of pollinator foraging range suggests transgene escape distances, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 36, pp. 13456-13461.

Pellegrino, G., Mahmoudi, M., Palermo, A.M. (2020) Pollen viability of EuroMediterranean orchids under different storage conditions: The possible effects of climate change, *Plant Biology*, vol. 23, no. 1, pp. 140-147, doi: 10.1111/plb.13185.

Pievani, T. (2014) The sixth mass extinction: Anthropocene and the human impact on biodiversity, *Rendiconti Lincei*, vol. 25, no. 1, pp. 85-93.

Potts, S.G., Jacobus, C.B., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Williams, E.K. (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers, *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 25, no. 6, pp. 345-353.

Powney, G.D., Carvell, C., Edwards, M., Morris, R.K., Roy, H.E., Woodcock, B.A., Isaac, N.J. (2019) Widespread losses of pollinating insects in Britain, *Nature communications*, vol. 10, no. 1, pp. 1-6.

Price, M.V., Waser, N.M. (1998) Effects of experimental warming on plant reproductive phenology in a subalpine meadow, *Ecology*, vol. 79, no. 4, pp. 1261-1271.

Rader, R., Bartomeus, I., Garibaldi, L.A., Garratt, M.P., Howlett, B.G., Winfree, R., Bommarco, R. (2016) Non-bee insects are important contributors to global crop pollination, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 1, pp. 146-151.

Reddy, P.V.R., Verghese, A., Sridhar, V., VarunRajan, V. (2012) Plant-pollinator interactions: A highly evolved synchrony at risk due to climate change, *Adaptation and Mitigation Strategies for Climate Resilient Horticulture*, Published byIIHR, Bangalore, pp. 274-281.

Reddy, P.V., Verghese, A., Rajan, V.V. (2012) Potential impact of climate change on honeybees (*Apis* spp.) and their pollination services, *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, vol. 18, no. 2, pp. 121-127.

Reddy, P.V.R., Verghese, A., Sridhar, V., Rajan, V.V. (2013) Plant-pollinator interactions: a highly evolved synchrony at risk due to climate change, *Climate-Resilient Horticulture: Adaptation and Mitigation Strategies*, Springer, India, pp. 295-302.

Roy, D.B., Sparks, T.H. (2000) Phenology of British butterflies and climate change, *Global change biology*, vol. 6, no. 4, pp. 407-416.

Rusterholz, H.P., Erhardt, A. (1998) Effects of elevated CO₂ on flowering phenology and nectar production of nectar plants important for butterflies of calcareous grasslands, *Oecologia*, vol. 113, no. 3, pp. 341-349.

Sánchez-Bayo, F., Wyckhuys, K.A.G. (2019) Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers, *Biological conservation*, vol. 232, pp. 8-27, available at: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>.

Seibold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarlı, D., Linsenmair, K.E. (2019) Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers, *Nature*, vol. 574, no. 7780, pp. 671-674.

Senapathi, D., Biesmeijer, J.C., Breeze, T.D., Kleijn, D., Potts, S.G., Carvalheiro, L.G. (2015) Pollinator conservation – the difference between managing for pollination services and preserving pollinator diversity, *Current Opinion in Insect Science*, vol. 12, pp. 93-101.

Stokstad, E. (2007) The case of the empty hives, *Science*, vol. 316, no. 5827, pp. 970-972.

Tsiftsis, S., Djordjević, V. (2020) Modelling sexually deceptive orchid species distributions under future climates: The importance of plant – pollinator interactions, *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1-12.

Tylianakis, J.M., Didham, R.K., Bascompte, J., Wardle, D.A. (2008) Global change and species interactions in terrestrial ecosystems, *Ecology letters*, vol. 11, no. 12, pp. 1351-1363.

Underwood, E., Darwin, G., Gerritsen, E. (2017) *Pollinator initiatives in EU Member States: Success factors and gaps*, Report for European Commission under contract for provision of technical support related to Target 2 of the EU Biodiversity Strategy to 2020 – maintaining and restoring ecosystems and their services ENV.B.2/SER/2016/0018, Institute for European Environmental Policy, Brussels, 67 p.

Van Asch, M., Van Tienderen, P.H., Holleman, L.J., Visser, M.E. (2007) Predicting adaptation of phenology in response to climate change, an insect herbivore example, *Global Change Biology*, vol. 13, no. 8, pp. 1596-1604.

Van Klink, R., Bowler, D.E., Gongalsky, K.B., Swengel, A.B., Gentile, A., Chase, J.M. (2020) Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances, *Science*, vol. 368, no. 6489, pp. 417-420.

Vasiliev, D., Greenwood, S. (2020) Pollinator biodiversity and crop pollination in temperate ecosystems, implications for national pollinator conservation strategies: Mini review, *Science of The Total Environment*, vol. 744, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140880.

Wagler, R. (2011) The anthropocene mass extinction: An emerging curriculum theme for science educators, *The American Biology Teacher*, vol. 73, pp. 78-83.

Waser, P.M. (1976) *Cercocebus albigena*: site attachment, avoidance, and intergroup spacing, *The American Naturalist*, vol. 110(976), pp. 911-935.

Waser, N.M., Chittka, L., Price, M.V., Williams, N.M., Ollerton, J. (1996) Generalization in pollination systems, and why it matters, *Ecology*, vol. 77, no. 4, pp. 1043-1060.

Waser, N.M., Real, L.A. (1979) Effective mutualism between sequentially flowering plant species, *Nature*, vol. 281, no. 5733, pp. 670-672.

Winfree, R., Williams, N.M., Dushoff, J., Kremen, C. (2007) Native bees provide insurance against ongoing honey bee losses, *Ecology letters*, vol. 10, no. 11, pp. 1105-1113.

Поступила в редакцию (Received): 28.04.2021 г.

Доработана после рецензирования (Revised): 25.07.2021 г.

Принята к публикации (Accepted): 04.08.2021 г.

Для цитирования / For citation:

Крыленко, С.В., Ясюкевич, В.В. (2021) Кризис опыления и вклад в него изменений климата, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 3, с. 15-49, doi:10.21513/2410-8758-2021-3-15-49.

Krylenko, S.V., Yasjukevich, V.V. (2021) Pollination crisis and the contribution of climate change, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 3, pp. 15-49, doi:10.21513/2410-8758-2021-3-15-49.
