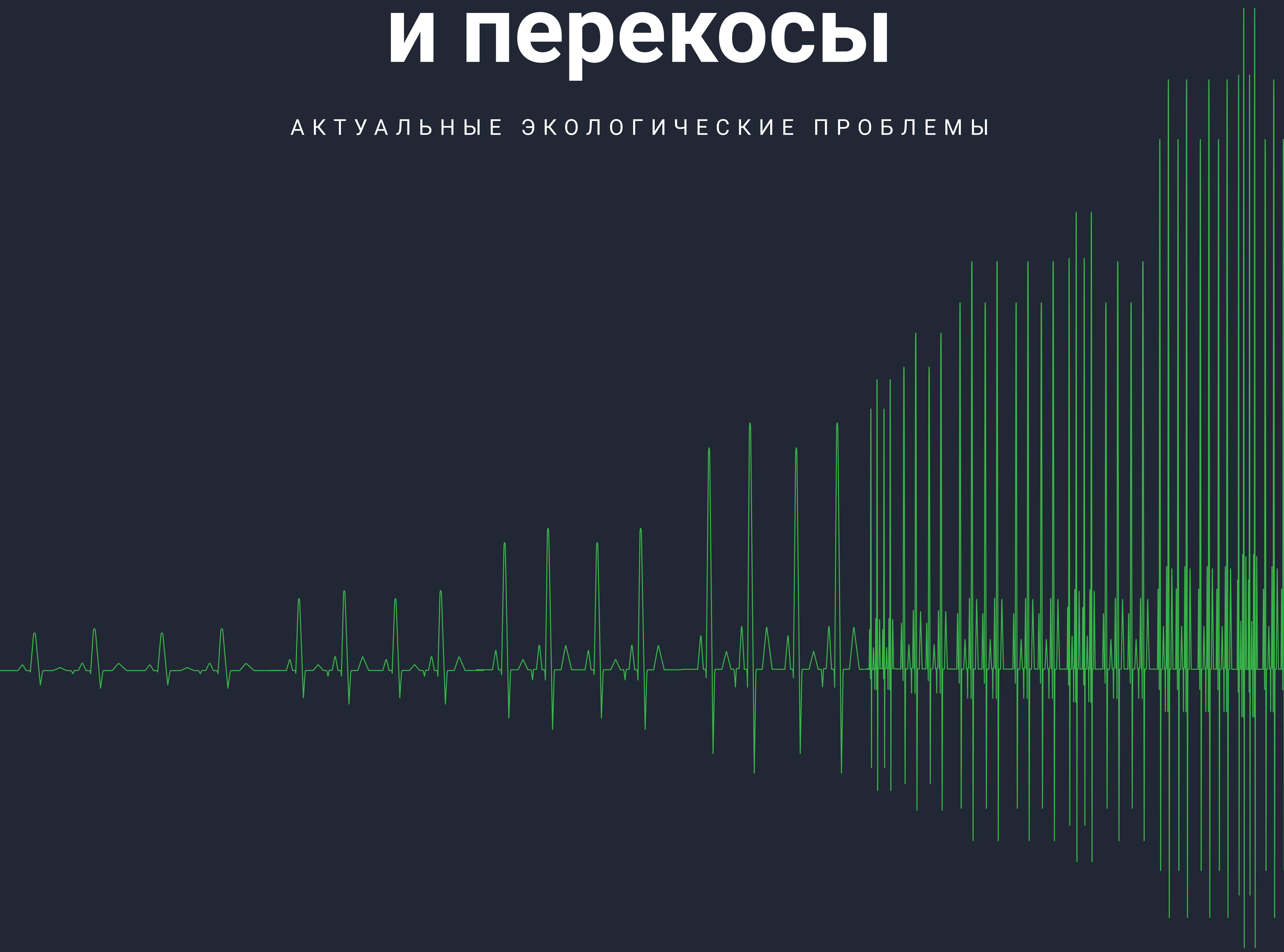
Шум, пламя и перекосы

АКТУАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ



ООН
программа по окружающей среде
50
1972-2022

«Передовые рубежи», 2022 г.

«Передовые рубежи», 2022 г.

ISBN: 978-92-807-3917-6
Номер задания: DEW/2415/NA

Правовые оговорки

Используемые обозначения и представление материала в настоящей публикации не подразумевают выражения какого-либо мнения со стороны Секретариата Организации Объединенных Наций относительно правового статуса какой-либо страны, территории, города или района или их властей, или относительно делимитации их границ или территорий.

Некоторые иллюстрации или графические изображения, представленные в этой публикации, могли быть адаптированы из контента, опубликованного третьими сторонами, чтобы проиллюстрировать собственную интерпретацию авторами ключевых сообщений, обусловленных такими сторонними иллюстрациями или графическими изображениями. В таких случаях материалы данной публикации не подразумевают выражения какого-либо мнения со стороны Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде относительно исходных материалов, использованных в качестве основы для таких графиков или иллюстраций.

Упоминание в этом документе коммерческой компании или продукта не означает их одобрения со стороны авторов или Программы ООН по окружающей среде. Использование информации из этого документа в рекламных целях запрещено. Названия и символы товарных знаков используются в редакционных целях без намерения нарушить законы о товарных знаках или авторском праве.

Мнения, выраженные в данной публикации, принадлежат авторам и не обязательно отражают точку зрения Программы ООН по окружающей среде. Мы сожалеем о любых ошибках или упущениях, которые могли быть допущены непреднамеренно.

Предлагаемое цитирование

Программа ООН по окружающей среде (2022 г.). *«Передовые рубежи», 2022 г. «Шум, пламя и перекосы: актуальные экологические проблемы».* Найроби.

Производство

Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде. https://www.unep.org/frontiers

«Передовые рубежи», 2022 г.

АКТУАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Содержание

Этот доклад предназначен для чтения с экранов. Распечатка некоторых страниц на листе стандартного формата А4 может привести к неразборчивому размеру шрифта.

1.

Слушая города

От шумного окружения к позитивным звуковым ландшафтам

2.

Лесные пожары в условиях изменения климата

Жгучий вопрос

3.

Фенология

Изменение климата меняет ритм природы

Предисловие

Человечество изменяло облик планеты в результате различных негативных воздействий, от влияния на потепление климата до постоянного уменьшения территорий дикой природы на суше и на море. Но наука о такой сложной системе, как Земля, должна быть в постоянном поиске — как решений для уже выявленных проблем, так и новых угроз, возникающих на нашем пути.

Отчет ЮНЕП «Передовые рубежи» делает это путем выявления и изучения областей, в которых появляются или сохраняются экологические проблемы. В выпуске 2022 года рассматриваются три проблемы: шумовое загрязнение в городах, растущая угроза лесных пожаров и сдвиги в сезонных явлениях, таких как цветение, миграция и спячка, вместе составляющих область исследований, известную как фенология.

По мере роста городов шумовое загрязнение становится главной угрозой для окружающей среды. Высокий уровень шума ухудшает здоровье и самочувствие человека, нарушая сон, и, кроме того, заглушает полезные и позитивные акустические коммуникации многих видов животных, обитающих в этих районах. Но решения этой проблемы уже есть: от электрификации транспорта до зеленых зон, которые следует включать в планирование городской застройки с целью снижения шумового загрязнения.

В то же время в последние годы по всему миру, от Австралии до Перу, возникали разрушительные лесные пожары. Тенденции к более пожароопасным погодным условиям, вероятно, будут усиливаться из-за повышения концентрации парниковых газов в атмосфере и сопутствующего повышения риска лесных пожаров. Следующее десятилетие будет иметь решающее значение для повышения устойчивости и способности адаптации к лесным пожарам, в том числе на границе между городскими районами и дикой природой. В частности, в дальнейших исследованиях необходимо изучить подверженность уязвимых групп факторам риска до, во время и после экстремальных лесных пожаров, а также действия по активизации усилий для предотвращения лесных пожаров и подготовке к ним.

Хотя лесные пожары являются впечатляющим следствием изменения климата, не меньшее беспокойство вызывают фенологические сдвиги. Растения и животные часто используют изменения температуры, приход дождей и продолжительность светового дня в качестве сигналов для начала следующего этапа сезонного цикла. Тем не менее, изменение климата ускоряется слишком быстро, чтобы многие виды растений и животных могли к нему адаптироваться, что вызывает нарушение функционирования экосистем. В качестве незамедлительных мер могут быть эффективны восстановление мест обитания, строительство коридоров для диких животных в целях улучшения связности мест обитания, изменение границ охраняемых территорий и сохранение биоразнообразия в благоприятных для этого ландшафтах. Тем не менее, в отсутствие энергичных усилий по сокращению выбросов парниковых газов эти меры по сохранению природы лишь отсрочат разрушение основных экосистемных услуг.

Этот доклад помогает понять, что изучение экосистем и того, как нам жить в гармонии с ними, является целью, которую мы все должны принять. Не может быть здорового общества без здоровой окружающей среды. Кроме того, нам нужна добросовестная научная практика, чтобы информировать об ответственной политике, поддерживающей здоровую окружающую среду, которую представляет доклад «Передовые рубежи».

Ингер Андерсен,
исполнительный директор
Программа Организации Объединенных Наций
по окружающей среде

Благодарности

Слушая города: от шумного окружения к позитивным звуковым ландшафтам

Автор
Франческо Алетта, Школа окружающей среды, энергетики и ресурсов Бартлетта, Университетский колледж Лондона, Лондон, Соединенное Королевство.

Рецензенты
Ангел Джамбов, факультет общественного здравоохранения Пловдивского медицинского университета, Пловдив, Болгария.
Гильермо Рей-Гозало, кафедра прикладной физики, Университет Эстремадура, Бадахос, Испания.
Джин Ён Чжон, факультет архитектурной инженерии, Университет Ханьян, Сеул, Республика Корея.
Доминик Потвин, факультет естественных наук, здравоохранения, образования и инженерии, Университет Саншайн-Кост, Мортон-Бей, Австралия.
Пауло Энрике Тромбетта Заннин, Факультет машиностроения, Федеральный университет Параны, Парана, Бразилия.
Сесилия Андерсон, Программа Организации Объединенных Наций по населенным пунктам (ООН-Хабитат), Найроби, Кения.
Сохель Рана, ООН-Хабитат, Найроби, Кения.
Хосе Чонг, ООН-Хабитат, Найроби, Кения.
Хуэй Ма, Школа архитектуры, Тяньцзиньский университет, Тяньцзинь, Китай.

Лесные пожары в условиях изменения климата: жгучий вопрос

Авторы
Ливия Карвалью Моура, Институт общества, населения и природы, Бразилиа, Бразилия.
Люк Перселл, Национальный центр обмена ресурсами AFAC, Мельбурн, Австралия.
Сара Боултер, Университет Гриффита, Брисбен, Австралия.
Эндрю Дауди, Мельбурнский университет, Мельбурн, Австралия.

Рецензенты
Кристина Дель Росио Монтьель-Молина, кафедра географии Мадридского университета Комплутенсе, Мадрид, Испания.
Мэттью П. Томпсон, Исследовательская станция Роки-Маунтин, Лесная служба США, Колорадо, США.
Хуан Пабло Арганьяраз, Институт Гулича (CONAE-UNC), CONICET, Кордова, Аргентина
Шелдон Стридом, Департамент географии и наук об окружающей среде, Школа геолого-пространственных наук, Северо-Западный университет, Мафикенг, Южная Африка.

Фенология: изменение климата меняет ритм природы

Автор
Марсель Э. Виссер, Департамент экологии животных, Нидерландский институт экологии (NIOO-KNAW), Вагенинген, Нидерланды.

Рецензенты
Гита Рамасвами, Фонд охраны природы, Бангалор, Индия.
Гэри Табор, Центр сохранения больших ландшафтов, Монтана, США.
Келли Ортега-Сиснерос, кафедра биологических наук, Кейптаунский университет, Южная Африка.
Леонор Патрисия Сердейра Мореллато, кафедра ботаники, Государственный университет Сан-Паулу, Сан-Паулу, Бразилия.
Ребекка Аш, кафедра биологии, Университет Восточной Каролины, США.
Сёко Сакаи, Центр экологических исследований Киотского университета, Япония.
Эльза Клеланд, отделение биологических наук, Калифорнийский университет, Сан-Диего, США.
Ян ван Гилс, Королевский институт морских исследований Нидерландов, т-Хорнтье, Нидерланды.
Ян Витасс, Швейцарский федеральный исследовательский институт WSL, Бирменсдорф, Швейцария.

Рецензенты ЮНЕП
Андреа Хинвуд, Дайанна Копански, Эдоардо Зандри, Цзянь Лю, Маартен Каппелле и Сьюзан Мутеби-Ричардс, ЮНЕП, Найроби, Кения.

Особая благодарность выражается
Ясуюки Аоно, Университет префектуры Осака, Япония; Татьяна Богданова, Global Forest Watch, США; Кэтрин Калбертсон, Калифорнийский университет, Беркли, США; Александра Хортон, Соединенное Королевство; Фредерик Баумгартен, Швейцарский федеральный исследовательский институт, Швейцария, Анджелин Джампу, Одри Ринглер, Бриджит Оханга, Кэролайн Мурейти, Конор Перселл, Дэниел Куни, Джейн Мурити, Жозефин Вамбуа, Кайса Уусимаа, Кэти Эллес, Кейшамаза Рукикайре, Магда Биесиада, Мария Виттория Галасси, Миранда Грант, Мозес Осани, Нада Матта, Нандита Сурендран, Неха Суд, Никольен Шоневельд-де Ланж, Полин Муго, Пуджа Мунши, Рейган Сиренго, Ричард Вайгучу, Саломе Чаманже, Сэмюэл Опийо, Шариф Шоуки, София Мендес, Тито Кимати, Тал Харрис , Вирджиния Гитари, Вамбуи Ндунгу, Яво Конко и Юнтинг Дуан, ЮНЕП, Найроби, Кения.

Производственный отдел
Руководители производства: Эдоардо Зандри и Маартен Каппелле, ЮНЕП, Найроби, Кения.
Главный редактор: Пинья Сарасас, ЮНЕП, Найроби, Кения.
Техническая поддержка: Аллан Лелей и Рейчел Коссе, ЮНЕП, Найроби, Кения.
Научный редактор: Кэтрин Макмаллен, Канада.

Иллюстрации, дизайн и компоновка
Карлос Рейес, Reyes Work, Барселона, Испания.

Слушая города

От шумного окружения к позитивным звуковым ландшафтам

Автор

Франческо Алетта, Школа окружающей среды, энергетики и ресурсов Бартлетта, Университетский колледж Лондона, Лондон, Соединенное Королевство.

Соавторы и рецензенты

Ангел Джамбов, факультет общественного здравоохранения Пловдивского медицинского университета, Пловдив, Болгария.
Гильермо Рей-Гозало, факультет прикладной физики, Университет Эстремадура, Бадахос, Испания.
Джин Ён Чжон , факультет архитектурного проектирования, Университет Ханьян, Сеул, Республика Корея.
Доминик Потвин, факультет естественных наук, здравоохранения, образования и инженерии, Университет Саншайн-Кост, Мортон-Бей, Австралия.
Пауло Энрике Тромбетта Заннин, факультет машиностроения, Федеральный университет Параны, Парана, Бразилия.
Сесилия Андерсон, Программа Организации Объединенных Наций по населенным пунктам (ООН-Хабитат), Найроби, Кения.
Сохель Рана, ООН-Хабитат, Найроби, Кения.
Хосе Чонг, ООН-Хабитат, Найроби, Кения.
Хуэй Ма, Школа архитектуры, Тяньцзиньский университет, Тяньцзинь, Китай.

Прокрутить страницу вниз

1. Окружающие звуки: наша акустическая среда

Звуки – это сложные физические явления, возникающие в результате вибрации источника, распространяющего в среде энергию в виде акустической волны. Звуки возникают постоянно и повсюду: на планете не существует такого понятия как «тишина». В качестве физических явлений звуки не могут быть ни положительными, ни отрицательными. Они приобретают смысл и вызывают эффект только тогда, когда рассматриваются с точки зрения слушателя. Нежелательные звуки называются шумом. Когда шум слишком громкий и длится слишком долго, он становится шумовым загрязнением.

В настоящее время шумовое загрязнение представляет собой серьезную экологическую проблему, которую считают основным экологическим риском для здоровья людей всех возрастных и социальных групп и дополнительным бременем для общественного здравоохранения. Продолжительное воздействие высоких уровней шума ухудшает здоровье и самочувствие человека, что вызывает растущую озабоченность как у населения, так и у политиков[1]. В настоящее время в Европейском союзе не менее 20 процентов граждан подвергаются воздействию такого уровня дорожного шума, который считается опасным для здоровья. Эта оценка является средней, причем в городских районах этот процент гораздо выше[2]. Обычными источниками шумового загрязнения являются авто- и железные дороги, аэропорты и промышленность, однако высокий уровень шума может быть вызван и в ходе проведения домашних или развлекательных мероприятий. Транспортный и другой городской шум не только влияет на благополучие человека, но мешает и угрожает выживанию видов, имеющих важнейшее значение для городской среды[3].

Единицами измерения интенсивности или громкости звука являются децибелы (дБ), они помогают предсказать пороговые значения, когда шум начинает раздражать людей или вызывать нарушения сна. Хотя громкость шума важна, к факторам, определяющим физическое и психологическое воздействие, которое шум оказывает на слушателя, относятся также частота с точки зрения высоких или низких тонов и временные характеристики звука[4].

Однако о качестве звука нельзя судить только по его физическим свойствам. Определение шума как нежелательного звука подразумевает психологическую концепцию[6]. Хотя снижать уровень шума, когда его интенсивность наносит физический вред людям, необходимо, ограничиваться этим критерием было бы недостаточно. Все более актуальным становится изучение звуковых фонов, которые способствуют физическому и психологическому благополучию людей, особенно в городской среде[7].

Тем не менее, большинство людей согласятся с тем, что безмолвный мир нежелателен, поскольку звуки могут обогащать нашу жизнь, восстанавливать ощущение здоровья и благополучия, а также придавать смысл нашей повседневной жизни[7]. Они помогают определить особенности мест и культур, формируют качество жизни. Некоторые городские звуки могут быть уникальными для сообщества и дополнять его культурную самобытность, вплоть до того, что они становятся историческими акустическими ориентирами[9]. Например, вызывают воспоминания звуки Биг-Бена в Лондоне или призывы к молитве из мечети аль-Харам в Мекке. В более широком понимании акустический комфорт следует рассматривать не просто как отсутствие шума, а скорее всего как ситуацию, когда окружающие звуки дают людям широкие возможности для процветания и заботы о своем физическом и психическом благополучии.

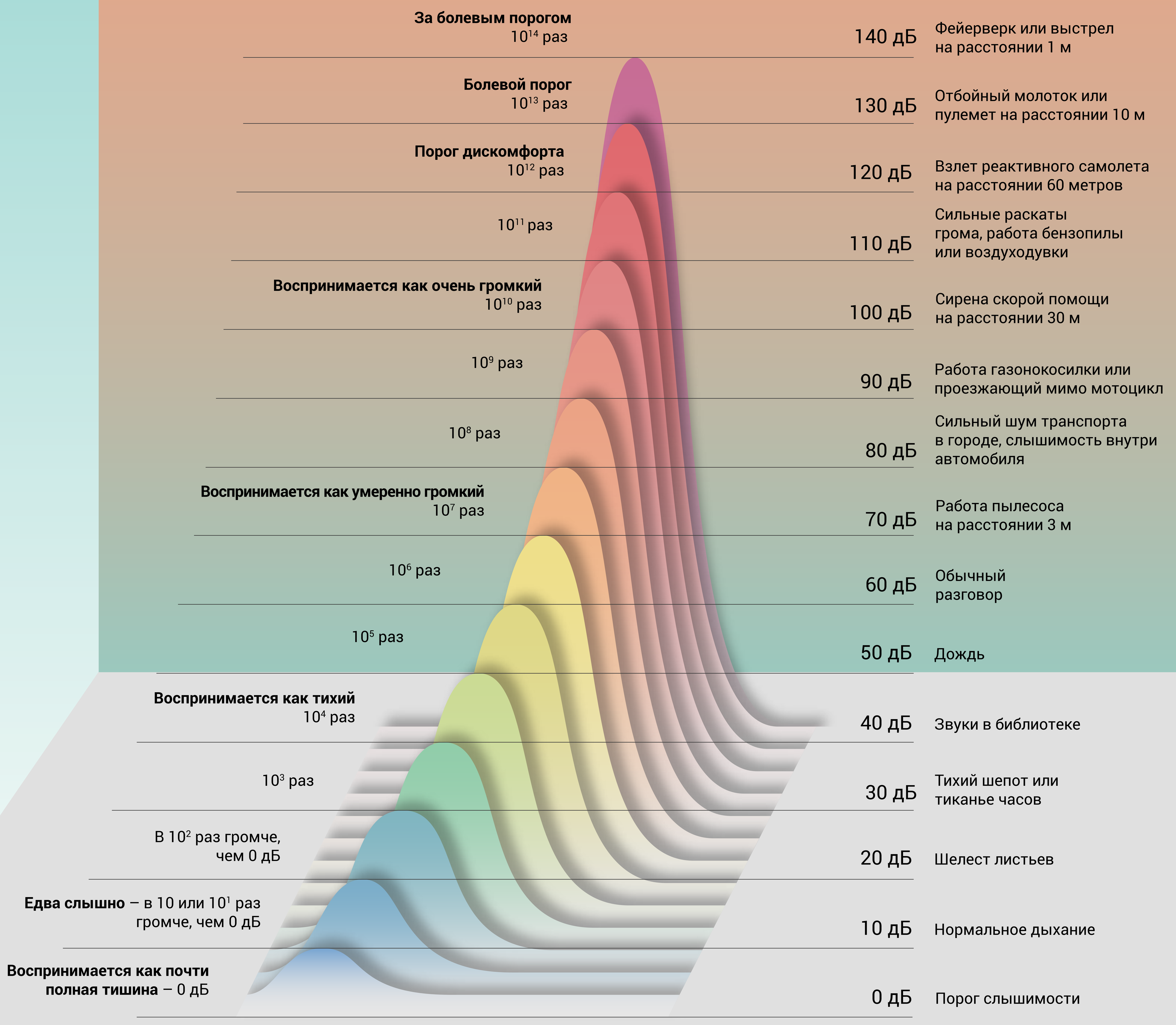
Что такое звуковая среда?

Международная организация по стандартизации (ISO) определяет звуковую среду как «акустическую среду, воспринимаемую или переживаемую и/или понимаемую человеком или людьми в определенном контексте»[10]. Другими словами, звуковая среда охватывает то, как люди воспринимают и ощущают весь спектр звуков, а также реагируют на него в данном месте в данное время[11]. Изучение звуковой среды в качестве новой дисциплины пытается рассмотреть проблему городской акустической среды комплексно, учитывая ее восприятие слушателем[12]. Подход, учитывающий звуковую среду, как правило, фокусируется на контексте, на желаемых, а не нежелательных звуках и на индивидуальных предпочтениях, а не на дискомфорте[13].

Измерение шума

Давление или интенсивность звука обычно обозначаются в децибелах или дБ. Поскольку диапазон звукового давления, который может уловить человеческое ухо, очень велик, шкала децибел является логарифмической: она основана на степенях числа 10.

По шкале дБ самый низкий слышимый звук, воспринимаемый как почти полная тишина, равен 0 дБ. Звуку, в 10^{1} раз превышающему 0 дБ, присваивается уровень звука 10 дБ. Но это увеличение в 10 дБ ухом обычно воспринимается как удвоение громкости. Звук в 100 раз или в 10^{2} раз более интенсивный, чем 0 дБ, обозначается как 20 дБ и так далее. То есть, каждое увеличение на 10 дБ эквивалентно увеличению звукового давления еще в 10 раз.



Полный список литературы см. на стр. 39.

2. Звуковые эффекты

Неблагоприятное воздействие шума на здоровье населения проявляется различными способами и вызывает увеличивающуюся озабоченность в мире. Оно охватывает широкий спектр последствий, начиная от легкого и временного беспокойства и заканчивая тяжелыми и хроническими физическими нарушениями. Шум в ночное время мешает спать и влияет на самочувствие на следующий день. По оценкам, в Европе 22 миллиона и 6,5 миллиона человек страдают от хронического раздражения шумом и нарушения сна соответственно[2]. Пожилые люди, беременные женщины и вахтовые работники относятся к числу лиц, подверженных риску нарушения сна, вызванного шумом[2,14].

Поскольку сон необходим для гормональной регуляции и работы сердечно-сосудистой системы, пробуждения, вызванные шумом, могут вызывать целый ряд физиологических и психологических стрессовых реакций[14,15]. Появляется все больше доказательств того, что воздействие дорожного движения является фактором риска развития таких сердечно-сосудистых и метаболических расстройств, как повышенное кровяное давление, артериальная гипертензия, ишемическая болезнь сердца и диабет[16]. По самым скромным подсчетам, длительное воздействие окружающего шума приводит к 48 000 новых случаев ишемической болезни сердца и ежегодно вызывает в Европе 12 000 преждевременных смертей[2].

Два 15-летних исследования с участием постоянных жителей Торонто (Канада) показали, что воздействие шума дорожного движения увеличивает риск острого инфаркта миокарда и застойной сердечной недостаточности, а также увеличивает заболеваемость сахарным диабетом на 8 процентов и гипертонией на 2 процента[17,18]. В этих исследованиях результаты корректировали с учетом влияния обусловленного дорожным движением загрязнения воздуха, которое связано с теми же последствиями. Анализ страновых данных о здоровье и шуме в Корее показал, что каждое повышение дневного шума на 1 децибел увеличивает число случаев сердечно-сосудистых и цереброваскулярных заболеваний на 0,17-0,66 процента[19].

Для разработки руководящих принципов и рекомендаций в целях защиты здоровья человека от воздействия исходящего из различных источников окружающего шума Европейское региональное бюро Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) проводило систематические обзоры для оценки связи между шумом и последствиями для здоровья[1]. Влияние шума на здоровье включает такие последствия, как раздражение, сердечно-сосудистые и метаболические эффекты, когнитивные нарушения, влияние на сон, нарушение слуха и шум в ушах, неблагоприятные исходы родов, а также качество жизни, психическое здоровье и благополучие. Рассмотренные в этих обзорах источники шума включают в себя дорожное движение, железные дороги, самолеты, ветряные турбины, а также такие виды досуга, как посещение спортивных мероприятий или концертов, прослушивание музыки через персональные устройства и другие развлечения.

Основываясь на этих обзорах, ВОЗ рекомендует определенные пороговые значения воздействия во избежания неблагоприятных последствий для здоровья. Средние пороговые значения указаны для дневного, вечернего и ночного уровней шума, а также только для ночного уровня. Это усредненные по времени показатели шума за соответствующий период времени, выраженные в дБ и отслеживаемые на наиболее открытой к шуму стороне здания. Ограничения, рекомендуемые для ночного периода времени, всегда ниже по сравнению с полным 24-часовым периодом, поскольку определенные источники шума и события могут быть более заметными при меньшей активности, что приводит к нарушению сна и более частым пробуждениям[1,20]. Основой для рекомендуемых пороговых значений воздействия послужили научные данные, использованные в обзоре ВОЗ из исследований, представляющих многочисленные регионы на разных континентах. Этот всеобъемлющий охват способствует принятию этих пороговых значений для информационного обеспечения политики против шума во всем мире.

Напротив, некоторые звуки приносят пользу здоровью, особенно звуки природы. В ряде систематических обзоров были задокументированы практические исследования как клинического физиологического, так и субъективно-психологического самочувствия в зависимости от акустической среды[21,22]. В обзорах сообщалось о позитивном влиянии естественных звуков и тишины на физическое и психическое здоровье. Важность естественных звуков для общего самочувствия может быть связана и с эволюционными преимуществами. Естественные звуки могут указывать на безопасную обстановку, снижать чувство беспокойства и способствовать психическому восстановлению, в то время как отсутствие естественных звуков может спровоцировать состояние повышенного внимания и бдительности, особенно у представителей уязвимых групп[23,24].

В Европе длительное воздействие окружающего шума является причиной

12 000

преждевременных смертей и способствует

48 000

новых случаев ишемической болезни сердца ежегодно.

22 миллиона

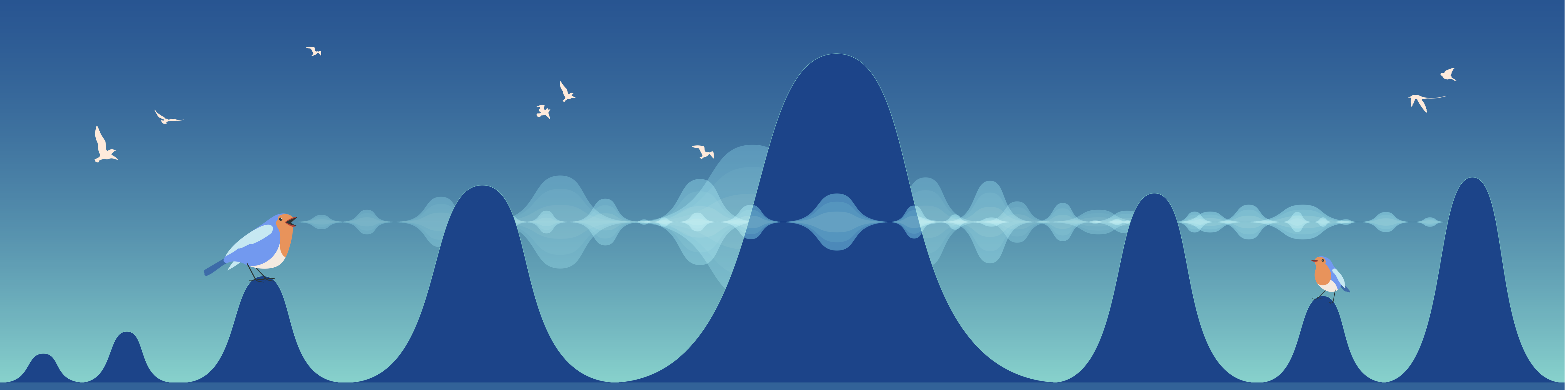
человек в Европе страдают от хронического раздражения шумом.

Рекомендации ВОЗ в отношении уровня шума

Для предотвращения вредных последствий для здоровья интенсивность шума должна быть ниже указанных уровней[1].

Источник шума	Максимальный уровень шума днем-вечером-ночью $L_{день}$	Максимальный уровень шума в ночное время $L_{ночь}$
Дорожное движение	53 дБ	45 дБ
Железная дорога	54 дБ	44 дБ
Самолет	45 дБ	40 дБ
Ветряная турбина	45 дБ	(Недостаточно доказательств для принятия ограничительных мер)

Оглушенные шумом: городская фауна



Акустическая коммуникация жизненно важна для многих видов животных. Акустические сигналы используются в различных коммуникативных контекстах, включая защиту территории, предупреждение об опасности, поиск или привлечение партнера и заботу о потомстве. В то время как резкие и непредсказуемые звуки могут восприниматься животными как угроза, такие постоянные акустические помехи, как шум транспорта, могут мешать акустической коммуникации и менять поведение ряда видов[1,25-27].

Очевидным ответом может показаться отказ от шумных мест обитания, но некоторые животные вместо этого приспосабливаются к шуму, изменяя время или характер голосовых сигналов, чтобы они не заглушались окружающими звуками. Во избежание сильных акустических помех днем малиновки в европейских городах, похоже, больше поют ночью, в то время как в городских парках Боготы (Колумбия) рыжеошейниковые овсянки в местах с интенсивным дневным движением начинают свой утренний хор ранним утром[28,29]. Некоторые лягушки квакают с перерывами, выжидая паузы в окружающем шуме[30].

Другие виды изменяют свои звуковые сигналы, переключая частоту голоса или высоту тона и амплитуду, чтобы противодействовать низкочастотному шуму транспорта. В городских шумных районах многие виды городских птиц с естественной низкой частотой звуков поют на более высоких частотах[31-33]. Проведенные в 30 парах городских и лесных районов континентальной Европы, Японии и Соединенного Королевства исследования показали, что городские большие синицы поют свои песни с более высокой частотой, чем их лесные собратья[34-36]. Зебровые амадины и белоголовые зонотрихии в ответ на городской шум замедляют свои мелодии[37-38]. Эти же типы голосовых модификаций наблюдались у лягушек и таких насекомых, как кузнечики, живущих рядом с шумными магистралями[39-42].

Эти изменения, безусловно, помогают животным слышать друг друга в шумной среде, но иногда изменение звучания делает их менее привлекательными для потенциальных партнеров, что влияет на репродуктивный успех[3,30]. И если виды не обладают поведенческой гибкостью в отправке или приеме сигналов, неспособность общаться может привести к их вытеснению из их среды обитания с серьезными экологическими последствиями[3,27].

Проверка звука: **насколько шумны города?**

На рисунке представлены уровни шума, обусловленные дорожным движением (дБ, LAeq) и измеренные в определенное время дня в разных городах. Данные собраны из различных исследовательских публикаций, в которых использовались различные методологии. В соответствии с рекомендациями ВОЗ в отношении бытового шума от 1999 года, рекомендуемые пределы составляют 55 дБ LAeq для открытых жилых зон и 70 дБ LAeq для транспортных и коммерческих зон[19]. Значения дБ рассчитаны на основе показателя Lдень, среднего уровня шума днем, вечером и ночью, который отличается от показателя LAeq.

Нью-Йорк

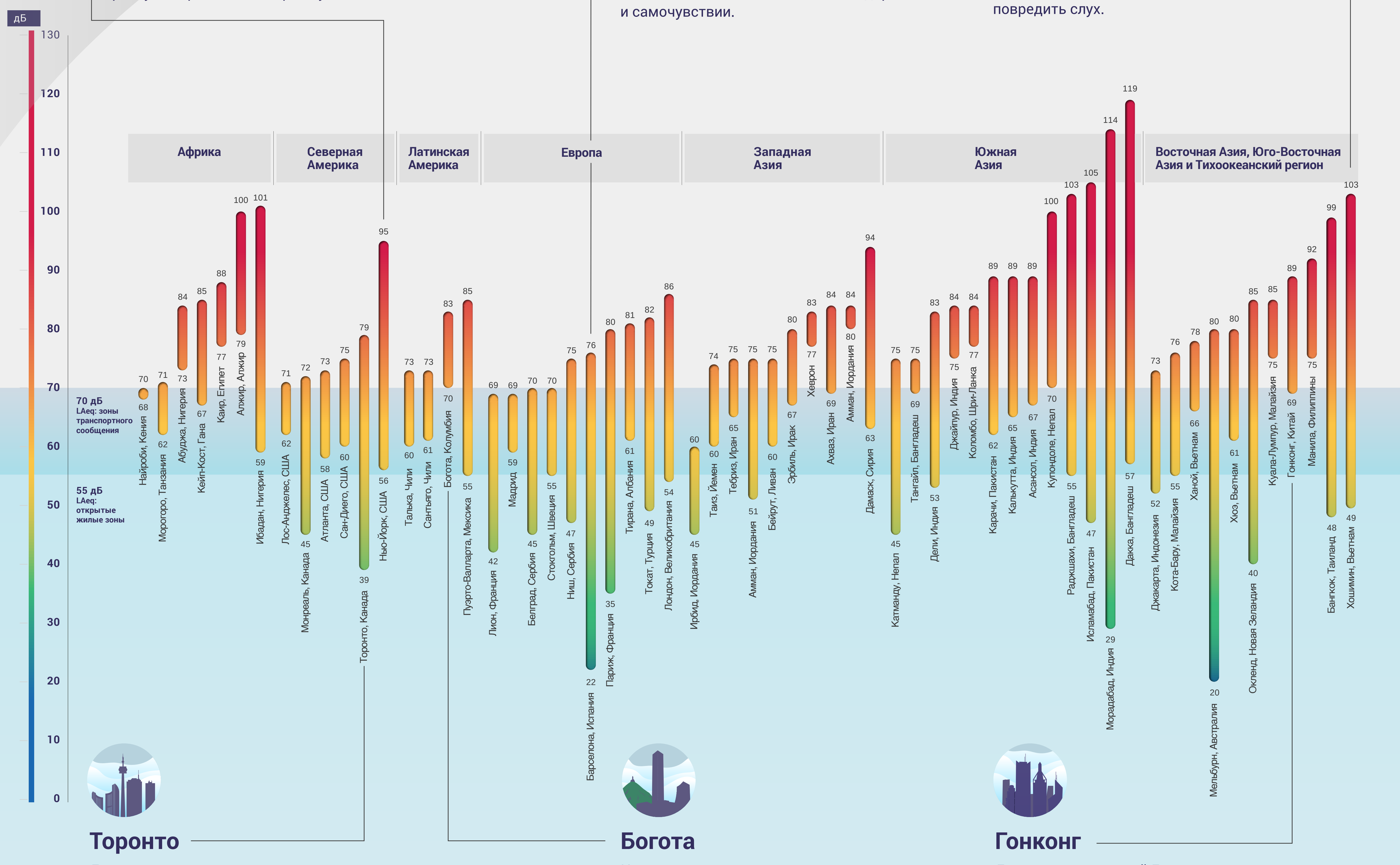
Более двух миллионов человек пользуются общественным транспортом в мегаполисах Нью-Йорка. 9 из 10 пассажиров общественного транспорта в Нью-Йорке подвергаются шумовому воздействию, уровень которого превышает рекомендуемый предел в 70 дБ, а также могут подвергаться риску необратимой потери слуха.

Барселона

Более 72 процентов городских жителей подвергаются шумовому воздействию, уровень которого выше 55 дБ. Более половины обитателей крупных европейских городов живут в районах, где уровень шума может негативно сказаться на их здоровье и самочувствии.

Хошимин

Исследование с участием велосипедистов, проехавших более 1000 км по городу, показало, что велосипедисты подвергаются шумовому воздействию, уровень которого выше 78 дБ, что может повредить слух.



Торонто

Два исследования, проведенные в течение 15 лет с участием постоянных жителей Торонто, показали, что воздействие дорожного шума увеличивает риск острого инфаркта миокарда и застойной сердечной недостаточности, а также повышает заболеваемость сахарным диабетом на 8 процентов и гипертонией на 2 процента.

Богота

Исследование утреннего пения рыжеошейниковых овсянок, обитающих в общественных парках Боготы, показало, что птицы изменили свое певческое поведение в преддверии утреннего часа пик, начиная петь раньше в местах с интенсивным дневным движением.

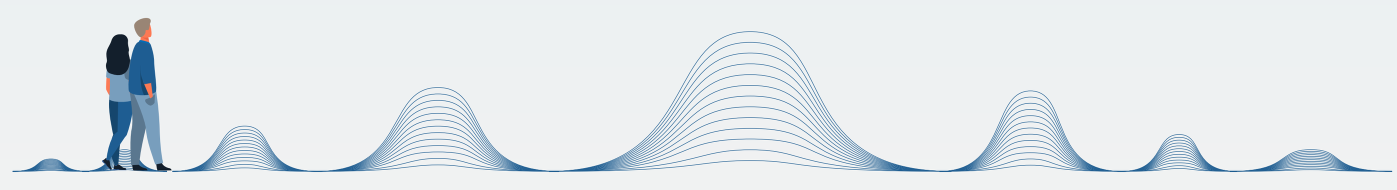
Гонконг

Двое из пяти жителей Гонконга подвергаются воздействию дорожного шума, уровень которого превышает допустимый предел. Ключевую роль в распространении шума играют структура города и конструкция зданий. Жители с более низким доходом и неблагополучными жилищными условиями больше страдают от шума транспорта по сравнению с более состоятельными жителями.

Полный список литературы см. на стр. 19.

Управление звуковой средой: **от снижения уровня шума до желаемой звуковой среды**

Воздействие таких источников окружающего шума, как дорожное движение, воздушные перевозки, железные дороги, тяжелая техника, промышленность и досуг, имеет документально подтвержденные негативные последствия для физического и психического здоровья. Борьба с шумом – это вопрос здравоохранения, и городским планировщикам настоятельно рекомендуется создавать и сохранять все больше тихих пространств для формирования комфортной городской звуковой среды.



Звуковая среда

Звуковая среда отражает восприятие, ощущения и реакцию людей на звуки в данном месте в данное время. Планирование звуковой среды направлено на создание комфортной акустической среды, которая улучшает восприятие этого места людьми. Звуковое оформление учитывает контекстуальные характеристики места, включая воспринимаемые акустические параметры, физические особенности, природные факторы, назначение, использование и сообщество пользователей.

Зрение и звук

И зрение, и звук влияют на восприятие окружающего мира человеком. Среда влияет на звуковое окружение и наоборот. Визуальное окружение является жизненно важным фактором при планировании и проектировании звуковой среды.

«Зеленые» решения

Растительность в городской среде может поглощать акустическую энергию, рассеивать шум и уменьшать его усиление на улицах. Ряды деревьев и кустарников, зеленые стены и зеленые крыши оказывают положительные визуальные эффекты, а также помогают усилению естественных звуков, привлекая городскую фауну.

Лесозащитные полосы

Придорожные лесозащитные полосы могут обеспечивать шумозащиту при условии достаточно высокой плотности посадки биомассы. Ослабление шума может быть усилено правильным выбором породы деревьев, размера ствола, длины и глубины полосы, расстояния от источника шума и схемы посадки.

Зеленые крыши

Крыши с растительностью ослабляют звук, поглощая его распространение с улицы поверх крыш в тихие части.

Электрические транспортные средства

Даже электромобили издают шум при движении со скоростью выше 50 км/ч из-за соприкосновения шин с дорогой. Такие решения, как пористые асфальтовые покрытия, могут снизить уровень шума на более высоких скоростях.

Способы вмешательства

Инженерные решения направлены на преграждение пути между источником и приемником звука. Разорвать цепь распространения шума могут такие меры, как шумозащитные экраны вдоль автомобильных или железных дорог, земляные валы, габионы, а также использование звукоизоляционных материалов и архитектурных элементов в зданиях.

Ослабление звука в источнике

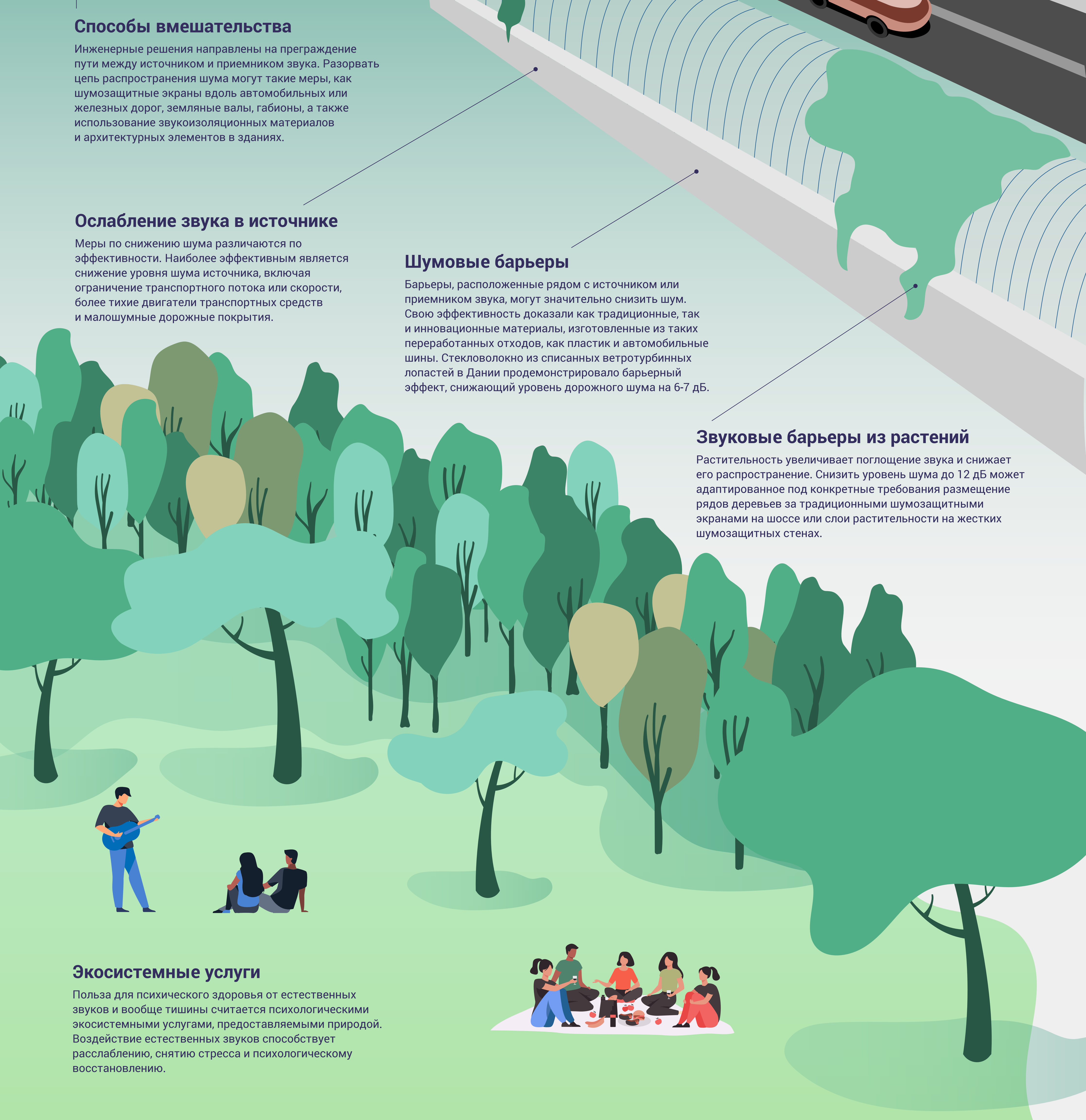
Меры по снижению шума различаются по эффективности. Наиболее эффективным является снижение уровня шума источника, включая ограничение транспортного потока или скорости, более тихие двигатели транспортных средств и малошумные дорожные покрытия.

Шумовые барьеры

Барьеры, расположенные рядом с источником или приемником звука, могут значительно снизить шум. Свою эффективность доказали как традиционные, так и инновационные материалы, изготовленные из таких переработанных отходов, как пластик и автомобильные шины. Стекловолокно из списанных ветротурбинных лопастей в Дании продемонстрировало барьерный эффект, снижающий уровень дорожного шума на 6-7 дБ.

Звуковые барьеры из растений

Растительность увеличивает поглощение звука и снижает его распространение. Снизить уровень шума до 12 дБ может адаптированное под конкретные требования размещение рядов деревьев за традиционными шумозащитными экранами на шоссе или слои растительности на жестких шумозащитных стенах.



Экосистемные услуги

Польза для психического здоровья от естественных звуков и вообще тишины считается психологическими экосистемными услугами, предоставляемыми природой. Воздействие естественных звуков способствует расслаблению, снятию стресса и психологическому восстановлению.

Зеленое пространство

Положительное психологическое воздействие оказывают зеленые насаждения и растительность в городах. В общественных парках, садах и других небольших зеленых зонах звучат такие приятные звуки природы, как шелест листьев, качание ветвей деревьев и щебетание птиц. Звуки природы способствуют снятию стресса и восстановлению внимания.

Тихие места

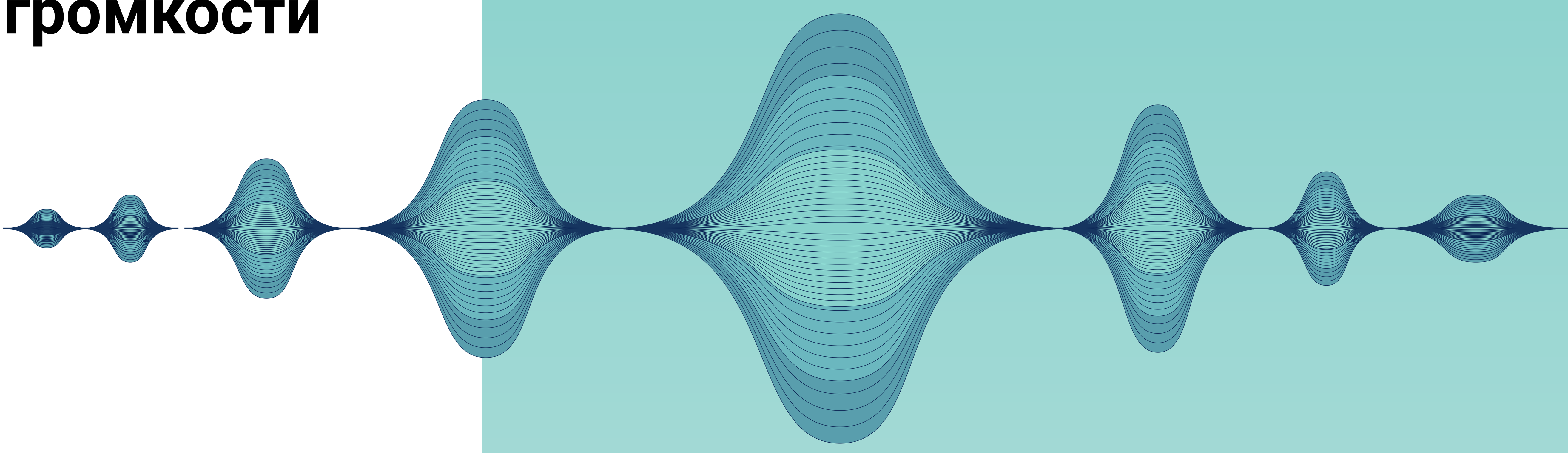
Тихие городские районы предлагают горожанам акустическую разгрузку от окружающего шума, что является необходимым условием для восстановления психики и хорошего самочувствия. Встречающиеся в городских парках, садах и других зеленых зонах естественные звуки создают умиротворяющую и тихую звуковую среду.

Создание особенной среды

Повседневные легкоузнаваемые звуки конкретного места помогают создать индивидуальность этого места. Когда эти звуки уникальны и передают отчетливое ощущение места со значением, выходящим за рамки местного сообщества, они становятся акустическими ориентирами и называются звуковыми метками.

Полный список литературы см. на стр. 21.

3. Уменьшение громкости



«Когда сложно достичь общего снижения шума в целом, важно гарантировать людям локальный доступ к тишине в общественных местах».

Как и большинство источников загрязнения, шум является проблемой, которую необходимо решать. Во многих странах есть соответствующая нормативно-правовая база и действуют законодательные требования, иногда они координируются на многосторонней основе, например в Европейском союзе[43,44]. Обычно такие меры направлены на устранение источников шума, поскольку это является наиболее экономически эффективным и простым способом обеспечить соблюдение требований. Возможные вмешательства включают управление автомобильным, железнодорожным и воздушным транспортным потоком, использование малошумных дорожных покрытий и железнодорожных путей, улучшение аэродинамики и компонентов для самолетов, а также переход от двигателей внутреннего сгорания к более тихим силовым установкам[2].

Государственные органы, промышленность и исследовательские учреждения сосредоточены в основном на технологических разработках такого рода. Альтернативные меры, ориентированные на прием звуковых сигналов, такие как установка шумозащитных экранов, как правило, менее рентабельны и решают проблему только локально, с дополнительным недостатком в виде потенциального негативного воздействия на ландшафт.

Снижение шума в городах может быть достигнуто также с помощью некоторых косвенных подходов. В национальный план по борьбе с шумом и сокращению его источников правительство Египта включило меры, приносящие попутную экологическую пользу. К ним относится поощрение использования велосипедов и принятие стандартов энергопотребления зданий для снижения уровня шума от систем кондиционирования воздуха[43,45]. В Берлине, Германия, в качестве косвенной стратегии для снижения шума используют новые широкие велосипедные дорожки. Этот подход направлен на сокращение доступного пространства для вождения моторизованных транспортных средств. Изначально более 500 000 жителей подвергались воздействию ночного шума с уровнем выше 50 дБ, поэтому многие городские дороги с двумя полосами движения в каждом направлении и объемом транзита до 20 000 автомобилей в день были сужены до однополосных дорог, освободив место для велосипедистов и пешеходов. Это переместило источник звукового излучения на середину дорог, подальше от жилых домов. В целом удалось снизить уровень ночного шума более чем для 50 000 жителей[2].

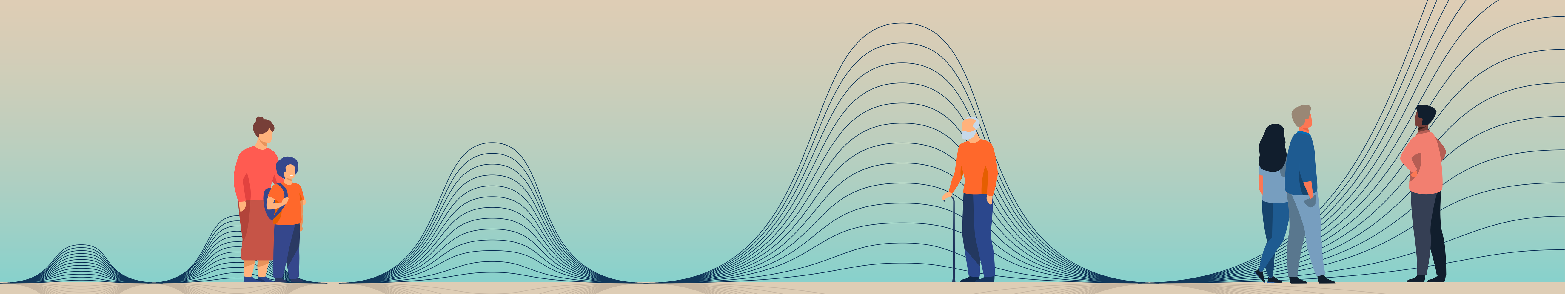
В апреле 2019 года в центре Лондона начала действовать Зона сверхнизких выбросов, которая в конце 2021 года была расширена и охватила территорию с населением 3,8 миллиона человек[46,47]. Хотя изначально ее целью было улучшение качества воздуха путем поощрения использования электрических и гибридных транспортных средств, она принесла пользу и для снижения шума, поскольку эти транспортные средства шумят намного меньше по сравнению с транспортными средствами с двигателем внутреннего сгорания, особенно на низких скоростях[48]. Однако снижение заметности бесшумных транспортных средств может угрожать безопасности пешеходов и, следовательно, привести к новой проблеме[49,50].

Среди городов с комплексной вертикальной застройкой и плотной дорожной сетью отдельным сложным случаем является Гонконг, в котором ключевыми факторами, влияющими на пространственное распределение источников шума в урбанизированной среде, являются землепользование и городская структура[51,52]. В связи с тем, что свыше миллиона жителей подвергаются воздействию дорожного шума интенсивностью более 70 дБ, власти проводят относительно агрессивную политику, сосредоточенную на проектировании инфраструктуры и планировании землепользования. Впрочем, ее успех носит довольно ограниченный характер[53-55].

В руководящих принципах ВОЗ по шумовым загрязнениям подчеркивается также, что политика должна быть сосредоточена не только на районах с высоким уровнем шума, но и на тех, где существуют или могут быть созданы позитивные звуковые ландшафты[1,56,57]. В отношении окружающего шума многие политики и местные органы власти признают, что если трудно добиться в целом общего снижения шума, то важно гарантировать локальный доступ к тишине людям в общественных местах[57]. Поэтому зачастую при урбанизации основное внимание уделяют выявлению и защите зон тишины, а также восстановлению природного потенциала, встроенного в городскую структуру[45]. Тихие городские парки, перестроенные тропинки каналов и железнодорожные ветки, карманные зеленые и синие зоны в многоквартирных домах, во дворах и садах, а также другие зоны отдыха — это все места, где люди могут укрыться от городского шума. Доступ к близлежащим тихим зонам способствует здоровью и благополучию местных жителей[58]. Хотя уровень шума является важным аспектом, качество звукового ландшафта зависит также от контекста и от неакустических факторов, включая чувство безопасности, отсутствие которого может вызывать серьезную озабоченность у женщин и родителей[23,58,60]. Под тихими районами часто понимают места с приятными звуковыми ландшафтами или места, где нежелательные звуки практически отсутствуют. Эти места часто сочетаются с такими позитивными элементами ландшафтного дизайна, как зеленые насаждения и водные объекты[59-61]. Формирование таких пространств или их защита является более пассивным, но все же ценным способом регулирования шума в городских районах.

«Под тихими районами обычно понимаются места с приятным звуковым ландшафтом или места, где нежелательные звуки в основном отсутствуют».

Усиленное воздействие на социально незащищенные категории населения



Шум неодинаково воздействует на здоровье различных людей или групп населения. Конкретные индивидуальные особенности могут повышать уязвимость человека. Индивидуальная чувствительность к шуму считается относительно стабильной и отчасти генетической чертой, не зависящей от уровня воздействия[62]. Чувствительность к шуму проявляется в виде повышенной настороженности и физиологической реакции на звуки. Высокая чувствительность к шуму способна усугублять реакцию на стресс и может быть связана с общим ухудшением здоровья человека[63].

Похоже, что возраст также влияет на нашу реакцию на звуки: более высокому риску воздействия определенных шумов подвержены очень молодые и пожилые люди[64-66]. Данные о гендерных различиях в уязвимости к шуму неоднозначны. Такие различия могут быть связаны с тем, как мужчины и женщины воспринимают факторы стресса и как они справляются с ними в целом[67,68].

В масштабах населения некоторые социальные группы также более уязвимы, чем другие[69]. У бедных людей меньше вариантов выбора жилья, что часто вынуждает их жить рядом с такими стрессовыми факторами окружающей среды, как свалки, промышленные зоны и дороги с высокой интенсивностью движения[70,71].

Длительное воздействие таких стрессовых факторов окружающей среды может обострять сопутствующие болезни людей, живущих в этих сообществах[72]. Исследования, проведенные во многих крупных городах, показывают, что социально незащищенные категории населения в большей степени подвержены воздействию более высоких уровней шума окружающей среды. Есть также признаки того, что в некоторых многорасовых обществах неравенство по воздействию шума может быть связано с разделением по этническому признаку[73-79].

Наличие доступа к общественным зеленым насаждениям и локальным тихим зонам может улучшить качество звукового ландшафта и смягчить негативное воздействие шума. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что позитивное воздействие на здоровье зеленых насаждений и соседних с ними участков сильнее всего проявляется в сообществах, принадлежащих к наиболее неблагополучным социально-экономическим группам[80]. Однако по сравнению с богатыми сообществами доступ к высококачественным общественным зеленым насаждениям для социально незащищенных групп более ограничен[80-84].

4. Здоровые решения для позитивных звуковых ландшафтов

«Шумовое загрязнение следует рассматривать в рамках более широкого круга экологических проблем с помощью комплексной политики, особенно в плане сочетания шума и загрязнения воздуха».

За последние несколько десятилетий директивные органы добились определенного прогресса в решении вопроса шумового загрязнения как проблемы для окружающей среды и здоровья населения. Однако были выявлены два существенных недостатка. Во-первых, это неотъемлемое ограничение при использовании реактивного подхода, когда основное внимание уделяется снижению уровня шума задним числом. Во-вторых, нужно не только думать о звуке с точки зрения дискомфорта, как в случае с транспортным и промышленным шумом, но и исследовать способы продвижения звуков, обеспечивающих комфорт. Эти две проблемы необходимо срочно решить, чтобы сделать города пригодными для жизни, и критическое значение в этом процессе имеет поддержка вмешательств, основанных на результатах исследований.

Для преодоления первого недостатка в любой стратегии городского развития следует учитывать звуки окружающей среды на самой ранней стадии планирования и проектирования, чтобы это не происходило слишком поздно и не влекло за собой значительные дополнительные расходы. Согласно европейским данным, более 50 процентов мер, направленных на борьбу с шумом, сосредоточены на его источнике, что часто бывает эффективным, но не обязательно обеспечивает качество звукового ландшафта[2]. Очень ограниченный процент мер, направленных на снижение звуков, учитывают при землепользовании или городском планировании, хотя все больше данных исследований показывают, что именно такой подход был бы наиболее устойчивым вариантом[85,86]. Поэтому крайне важно привлекать к процессам городского развития специалистов по акустике окружающей среды и городским звуковым ландшафтам, чтобы они общались с местными заинтересованными сторонами[87].

Кроме того, посредством комплексной политики шумовое загрязнение следует рассматривать в рамках более широкого круга экологических проблем, особенно в плане сочетания шума и загрязнения воздуха. Многие страны, опрошенные Европейским агентством по окружающей среде, сообщают об успешной политике, обеспечивающей сопутствующую пользу, в том числе о мерах по снижению дорожного движения, об экологически чистых транспортных средствах, энергоэффективных зданиях, посадках деревьев и кустарников для создания и соединения зеленых коридоров, а также об использовании переработанных материалов в инженерных решениях по снижению шума[2].

Для устранения второго недостатка необходимо расширить рамки разработки политики путем перехода от контроля звуков окружающей среды только в тех случаях, когда они вызывают шумовое загрязнение, к учету звуков окружающей среды как возможности создания здоровой среды обитания для людей всех возрастов, полов и социальных групп. Правительство Уэльса стремится сохранять или культивировать позитивные звуковые ландшафты, определяемые как места, «где природные звуки, такие как журчание воды, пение птиц, ветер в деревьях и человеческие разговоры, более заметны, чем фоновый шум уличного движения»[57].

Для роста позитивных звуковых ландшафтов и сохранения шумового загрязнения в допустимых пределах новые подходы должны учитывать не только их воздействие, но и восприятие шума людьми; это дополнит и расширит показатель в дБ для характеристики звуковых ландшафтов. Простое безмолвие или тишина не могут быть стандартом для оценки качества каждого городского пространства, хотя для некоторых контекстов, таких как городские парки или жилые районы, это было бы желательно. Нам необходимо, чтобы наши города были разнообразными по звучанию и инклюзивными в поддержке различного их использования, чего тишина не может дать.

«Нам необходимо, чтобы наши города были разнообразными по звучанию и инклюзивными в поддержке различного их использования, чего тишина не может дать».

Все большее число людей после того, как они пережили пандемию, признают связь между временем, проведенным на природе, и общим самочувствием[97]. Локдауны из-за COVID-19 заставили по-новому взглянуть на городские зеленые насаждения всех видов[98,99]. После пандемии градостроители стремятся восстановить по принципу «лучше, чем было», добавив больше зеленых насаждений, и некоторые особенно обеспокоены тем, чтобы эти зеленые насаждения приносили пользу в зачастую игнорируемых более бедных районах и тех районах, где живут социально незащищенные группы[100,101]. Звуки новых и обновленных пространств должны постоянно учитывать политики, градостроители, члены сообществ и другие заинтересованные стороны, участвующие в создании подходящих для жизни городов.

Звуковые ландшафты локдаунов

На распространение вируса SARS-CoV-2 в конце 2019 года правительства по всему миру отреагировали мерами по сдерживанию распространения инфекции[88]. Отмена большинства второстепенных коммерческих и социальных мероприятий, местных поездок на работу и других путешествий привели к снижению загрязнения окружающей среды, в том числе шумового[89].

Многие исследовательские группы и правительственные учреждения сообщали о снижении уровня шума, особенно в городских районах[90]. После первого локдауна 17 марта 2020 г. мониторинг в Париже выявил среднее снижение дорожного шума на 7,6 дБ по всей сети[91]. Также значительно снизился шум воздушного движения в районе аэропорта имени Шарля де Голля, достигнув 20,4 дБ.

В Мадриде сокращение дорожного движения и отсутствие людей на улицах привело к снижению уровня звука в диапазоне 4-6 дБ[92]. В исследовании, проведенном в Лондоне, в 11 местах сравнивали данные в разгар местного локдауна, среднее снижение шума составило 5,4 дБ[93]. В Сан-Франциско внезапное снижение человеческого шума привело к тому, что люди смогли слышать больше природных звуков, таких как пение птиц[94]. В Мумбаи в 2020 году контролировали в разных местах уровни шума во время празднования фестиваля Ганеша-чатуртхи в соответствии с муниципальными ограничениями, связанными с COVID-19. По сравнению с измерениями, проведенными в 2018 и 2019 годах, снижение уровня шума составило от 27,5 до 28,5 дБ[95]. Это всеобщее затишье, обусловленное пандемией, можно было обнаружить и в глобальном масштабе с помощью сейсмологических исследований, которые показали существенное снижение уровня шума во время карантина[96].

До сих пор неясны долгосрочные экологические последствия кризиса COVID-19, и текущие глобальные исследования должны дать дополнительную информацию. Неожиданная тишина от человеческих источников звука вызвала споры среди академических сообществ и общественности о том, как могут звучать современные города и достаточно ли мы делаем для достижения позитивного звукового ландшафта.

Хотя существует консенсус в отношении того, что ограничения, налагаемые мерами изоляции, привели к снижению уровня шума во многих городах, максимальное наблюдаемое снижение транспортного шума обычно оставалось в диапазоне всего 6-10 дБ. Хотя в большинстве ситуаций это было бы заметно для восприятия, этого снижения не всегда достаточно, чтобы довести шумовое загрязнение до безопасного уровня в соответствии с рекомендациями ВОЗ. Для улучшения качества звукового ландшафта в городах нужны различные стратегии планирования и инфраструктурных изменений, которые будут способствовать созданию более здоровой акустической среды.

Список литературы

1. World Health Organization (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region. *Copenhagen: WHO Regional Office for Europe*. https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region
2. European Environment Agency (2020). Environmental noise in Europe — 2020. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*. https://doi.org/10.2800/686249
3. Francis, C.D. and Barber, J.R. (2013). A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. Frontiers in Ecology and the Environment 11(6). https://doi.org/10.1890/120183
4. Basner, M., Brink, M., Bristow, A., de Kluizenaar, Y., Finegold, L., Hong, J. *et al.* (2015). ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011-2014 17(75), 57-82. https://doi.org/10.4103/1463-1741.153373
5. World Health Organization (2015). Hearing loss due to recreational exposure to loud sounds: A review. *Geneva: World Health Organization*. https://www.who.int/pbd/deafness/Hearing_loss_due_to_recreational_exposure_to_loud_sounds.pdf
6. Kjellberg, A. (1990). Subjective, behavioral and psychophysiological effects of noise. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 16(suppl 1), 29-38. https://doi.org/10.5271/sjweh.1825
7. Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T.T., Brown, L.A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B. *et al*. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. *Building and Environment* 108, 284-294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.011
8. Brown, A.L. (2010). Soundscapes and environmental noise management. *Noise Control Engineering Journal* 58(5), 493-500. https://doi.org/10.3397/1.3484178
9. Yelmi, P. (2016). Protecting contemporary cultural soundscapes as intangible cultural heritage: sounds of Istanbul. *International Journal of Heritage Studies* 22(4), 302-311. http://dx.doi.org/10.1080/13527258.2016.1138237
10. International Organization for Standardization (2014). ISO 12913-1:2014 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. *Geneva: ISO.*
11. Sztubecka, M., Skiba, M., Mrówczý, M. and Mathias, M. (2020). Noise as a Factor of Green Areas Soundscape Creation. *Sustainability* 12(3), 999. https://doi.org/10.3390/su12030999
12. Kang, J., and Schulte-Fortkamp, B. (eds.). (2015). Soundscape and the Built Environment. *Boca Raton: CRC Press*.
13. Brown, A.L. (2012). A Review of Progress in Soundscapes and an Approach to Soundscape Planning. *International Journal of Acoustics and Vibration,* 17(2), 73-81. http://doi.org/10.20855/ijav.2012.17.2302
14. Halperin, D. (2014). Environmental noise and sleep disturbances: A threat to health? *Sleep Science*, 7(4), 209-212. http://doi.org/10.1016/j.slsci.2014.11.003
15. Münzel, T., Gori, T., Babisch, W. and Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European Heart Journal* 35(13), 829–836. https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu030
16. Münzel, R., Schmidt, F.P., Steven, S., Herzog, J., Daiber, A. and Sørensen, M. (2018). Environmental Noise and the Cardiovascular System. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(6), 688-697. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.12.015
17. Bai, L., Shin, S., Oiamo, T.H., Burnett, R.T., Weichenthal, S., Jerrett, M. *et al*. (2020). Exposure to Road Traffic Noise and Incidence of Acute Myocardial Infarction and Congestive Heart Failure: A Population-Based Cohort Study in Toronto, Canada. *Environmental Health Perspectives* 128(8). https://doi.org/10.1289/EHP5809
18. Shin, S., Bai, L., Oiamo, T.H., Burnett, R.T., Weichenthal, S., Jerrett, M. *et al*. (2020). Association Between Road Traffic Noise and Incidence of Diabetes Mellitus and Hypertension in Toronto, Canada: A Population-Based Cohort Study. *Journal of the American Heart Association*, 9(6). https://doi.org/10.1161/JAHA.119.013021

19. Oh, M., Shin, K., Kim, K. and Shin, J. (2019). Influence of noise exposure on cardiocerebrovascular disease in Korea. *Science of The Total Environment*, 651, Part 2, 1867-1876. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.081

20. World Health Organization (1999). Guidelines for Community Noise. *Geneva: World Health Organization*.

21. Erfanian, M., Mitchell, A.J., Kang, J. and Aletta, F. (2019). The Psychophysiological Implications of Soundscape: A Systematic Review of Empirical Literature and a Research Agenda. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19), 3533. https://doi.org/10.3390/ijerph16193533

22. Aletta, F., Oberman, T. and Kang, J. (2018). Associations between Positive Health-Related Effects and Soundscapes Perceptual Constructs: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(11), 2392. https://doi.org/10.3390/ijerph15112392

23. Andringa, T.C., and Lanser, J.J.L. (2013). How pleasant sounds promote and annoying sounds impede health: A cognitive approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(4), 1439-1461. https://doi.org/10.3390/ijerph10041439

24. Buxton, R.T., Pearson, A.L., Allou, C., Fristrup, K. and Wittemyer, G. (2021). A synthesis of health benefits of natural sounds and their distribution in national parks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(14). https://doi.org/10.1073/pnas.2013097118

25. Francis, C.D., Ortega, C.P. and Cruz, A. (2011). Noise Pollution Filters Bird Communities Based on Vocal Frequency. *PLoS ONE* 6(11): e27052. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027052

26. Halfwerk, W., Lohr, B. and Slabbekoorn, H. (2018). Impact of Man-Made Sound on Birds and Their Songs. In *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*. Slabbekoorn, H., Dooling, R., Popper, A., Fay, R. (eds). *Springer Handbook of Auditory Research*, 66. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8574-6_8

27. Kunc, H.P. and Schmidt, R. (2019). The effects of anthropogenic noise on animals: a meta-analysis. *Biology Letters*, 15(11). http://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0649

28. Fuller, R.A., Warren, P.H. and Gaston, K.J. (2007). Daytime noise predicts nocturnal singing in urban robins. *Biology Letters* 3(4), 368-370. http://doi.org/10.1098/rsbl.2007.0134

29. Dorado-Correa, A.M., Rodríguez-Rocha, M. and Brumm, H. (2016). Anthropogenic noise, but not artificial light levels predicts song behaviour in an equatorial bird. *Royal Society Open Science*, 3(7). http://doi.org/10.1098/rsos.160231

30. Potvin, D.A. (2017). Coping with a changing soundscape: avoidance, adjustments and adaptations. *Animal Cognition* 20(1), 9-18. https://doi.org/10.1007/s10071-016-0999-9

31. Brumm, H. and Zollinger, S.A. (2013). Chapter 7, 187-227: Avian Vocal Production in Noise. In *Animal communication and noise*. Brumm, H. (ed.). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41494-7

32. Francis, C.D., Ortega, C.P. and Cruz, A. (2011). Noise Pollution Filters Bird Communities Based on Vocal Frequency. *PLoS ONE* 6(11), 305-313. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027052

33. Slabbekoorn, H. and den Boer-Visser, A. (2006). Cities change the songs of birds. *Current Biology* 16(23), 2326-2331. http://doi.org/10.1016/j.cub.2006.10.008

34. Hamao, S., Watanabe, M. and Mori, Y. (2011). Urban noise and male density affect songs in the great tit *Parus major*. *Ethology Ecology & Evolution*, 23(2), 111-119. http://doi.org/10.1080/03949370.2011.554881

35. Mockford, E.J. and Marshall, R.C. (2009). Effects of urban noise on song and response behaviour in great tits. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276(1669), 2979-2985. http://doi.org/10.1098/rspb.2009.0586

36. Zollinger, S.A., Slater, P.J.B., Nemeth, E. and Brumm, H. (2017). Higher songs of city birds may not be an individual response to noise. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1860), 20170602. http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.0602

37. Potvin, D.A., Curcio, M.T., Swaddle, J.P. and MacDougall-Shackleton, S.A. (2016). Experimental exposure to urban and pink noise affects brain development and song learning in zebra finches (*Taenopygia guttata*). *PeerJ – Life and Environment,* 4. https://doi.org/10.7717/peerj.2287

38. Moseley, D.L., Derryberry, G.E., Phillips, J.N., Danner, J.E., Danner, R.M., Luther, D.A. *et al*. (2018). Acoustic adaptation to city noise through vocal learning by a songbird. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285(1888). http://doi.org/10.1098/rspb.2018.1356

39. Caorsi, V.Z., Both, C., Cechin, S., Antunes, R. and Borges-Martins, M. (2017). Effects of traffic noise on the calling behavior of two Neotropical hylid frogs. *PLoS one,* 12(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183342

40. Higham, V., Deal, N.D.S., Chan, Y.K., Chanin, C., Davine, E., Gibbings, G. *et al*. (2021). Traffic noise drives an immediate increase in call pitch in an urban frog. *Journal of Zoology* 313(4). https://doi.org/10.1111/jzo.12866

41. Lampe, U., Reinhold, K. and Schmoll, T. (2014). How grasshoppers respond to road noise: developmental plasticity and population differentiation in acoustic signalling. *Functional Ecology*, 28(3), 660–668. https://doi.org/10.1111/1365-2435.12215

42. Parris, K.M., Velik-Lord, M. and North, J.M.A. (2009). Frogs call at a higher pitch in traffic noise. *Ecology and Society* 14(1), 25. http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art25/

43. Schwela, D. (2021). Environmental noise challenges and policies in low- and middle-income countries. *South Florida Journal of Health*, 2(1). https://doi.org/10.46981/sfjhv2n1-003

44. European Parliament and Council (2002). Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise. *Brussels: Publications Office of the European Union.*

45. Egypt, Ministry of Environment (2021). The National Plan to Combat Noise and Reduce its Sources. *Egyptian Environmental Affairs Agency*. https://www.eeaa.gov.eg/ar-eg/موضوعاتبيئية/الهواء/الضوضاء/خطةمكافحةالضوضاء.aspx (in Arabic). Accessed 21 September 2021.

46. Greater London Authority (2019). Central London Ultra Low Emission Zone – Four month report. *London: Greater London Authority.*

47. Transport for London (2021). Guide to ULEZ expansion. *Transport for London*. https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone/ulez-expansion. Accessed 21 September 2021.

48. Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N. and Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics,* 116*,* 59-64. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018

49. Misdariis, N. and Pardo, L.F. (2017). The sound of silence of electric vehicles – Issues and answers. *The 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (InterNoise)*. Hong-Kong, China, 27-30 August 2017. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01708883

50. Neurauter, L., Roan, M., Song, M., Miller, M., Glenn, E. and Walters, J. (2020). Quiet car detectability: Impact of artificial noise on ability of pedestrians to safely detect approaching electric vehicles. *Virginia Tech*. http://hdl.handle.net/10919/97586

51. Brown, A.L., Lam, K.C. and van Kamp, I. (2015). Quantification of the exposure and effects of road traffic noise in a dense Asian city: a comparison with western cities. *Environmental Health*, 14(22). http://doi.org/10.1186/s12940-015-0009-8

52. Lam, K.C., Ma, W., Chan, P.K., Hui, W.C., Chung, K.L., Chung, Y.T. *et al*. (2013). Relationship between road traffic noisescape and urban form in Hong Kong. *Environmental Monitoring and Assessment* 185, 9683-9695. https:/doi.org/10.1007/s10661-013-3282-4

53. Cai, C., Mak, C.M. and He, X. (2019). Analysis of Urban Road Traffic Noise Exposure of Residential Buildings in Hong Kong Over the Past Decade. *Noise & Health* 21(101), 142-154. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32719301/

54. Cheung, K.M.C., Wong, H.Y.C., Hung, W.C.T., Lau, K.K., Yim, Y.C.S. and Lee, Y.C.R. (2019). Development and application of specially designed windows and balconies for noise mitigation in Hong Kong. *Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings, InterNoise19*. Madrid, Spain, September 2019. http://www.sea-acustica.es/fileadmin/INTERNOISE_2019/Fchrs/Proceedings/2101.pdf

55. China-Hong Kong, Environmental Protection Department (2020). *Environmental Noise*. https://www.epd.gov.hk/epd/noise_education/web/ENG_EPD_HTML/index/index.html Accessed 21 September 2021.

56. UN-Habitat (2020). City-wide Public Space Assessment Toolkit - A guide to community-led digital inventory and assessment of public spaces*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme*.

57. Wales, Ministry of Environment (2018). Noise and Soundscape Action Plan 2018-2023. *Cardiff: Ministry of Environment*. https://gov.wales/sites/default/files/publications/2019-04/noise-and-soundscape-action-plan.pdf

58. Payne, S.R. and Bruce, N. (2019). Exploring the Relationship between Urban Quiet Areas and Perceived Restorative Benefits. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 16(9), 1611. https://doi.org/10.3390/ijerph16091611

59. Cerwén, G. (2019). Listening to Japanese Gardens: An Autoethnographic Study on the Soundscape Action Design Tool. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(23), 4648. https://doi.org/10.3390/ijerph16234648

60. European Environment Agency (2014). Good practice guide on quiet areas. *Luxembourg: Publications Office of the European Union.* https://doi.org/10.2800/12611

61. European Environment Agency (2016). Quiet Areas in Europe - The environment unaffected by noise pollution. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*. https://doi.org/10.2800/7586

62. Kliuchko, M., Heinonen-Guzejev, M., Vuust, P., Tervaniemi, M. and Brattico, E. (2016). A window into the brain mechanisms associated with noise sensitivity. *Scientific Reports*, 6, 39236. https://doi.org/10.1038/srep39236

63. Baliatsas, C., van Kamp, I., Swart, W., Hooiveld, M. and Yzermans, J. (2016). Noise sensitivity: symptoms, health status, illness behavior and co-occurring environmental sensitivities. *Environmental Research*, 150, 8-13. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.029

64. Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S. *et al*. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)61613-x

65. Stansfeld, S. and Clark, C. (2015). Health Effects of Noise Exposure in Children. *Current Environmental Health Report*, 2, 171-178. https://doi.org/10.1007/S40572-015-0044-1

66. Van Kamp, I. and Davies, H. (2013). Noise and health in vulnerable groups: A review. *Noise & Health*, 15(64), 153-159. https://doi.org/10.4103/1463-1741.112361

67. Eriksson, C., Bluhm, G., Hilding, A., Östenson, C.G. and Pershagen, G. (2010). Aircraft noise and incidence of hypertension – Gender specific effects. *Environmental research*, 110(8), 764-772. https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.09.001

68. Orban, E., McDonald, K., Sutcliffe, R., Hoffmann, B., Fuks, K.B., Dragano, N. *et al*. (2016). Residential road traffic noise and high depressive symptoms after five years of follow-up: Results from the Heinz Nixdorf recall study. *Environmental health perspectives*, 124(5), 578-585. https://doi.org/10.1289/ehp.1409400

69. Dreger, S., Schüle, S.A., Hilz, L.K. and Bolte, G. (2019). Social inequalities in environmental noise exposure: A review of evidence in the WHO European Region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1011. https://doi.org/10.3390/ijerph16061011

70. Dale, L.M., Goudreau, S., Perron, S., Ragettli, M.S., Hatzopoulou, M. and Smargiassi, A. (2015). Socioeconomic status and environmental noise exposure in Montreal, Canada. *BMC Public Health*, 15(1), 1-8. https://doi.org/10.1186/s12889-015-1571-2

71. Taylor, D.E. (2014). Toxic Communities: Environmental Racism, Industrial Pollution, and Residential Mobility. *NYU Press*. https://www.jstor.org/stable/24889758

72. Hajat, A., Hsia, C. and O'Neill, M.S. (2015). Socioeconomic disparities and air pollution exposure: a global review. *Current Environmental Health Reports*, 2(4), 440-450. https://doi.org/10.1007/s40572-015-0069-5

73. Casey, J.A., Morello-Frosch, R., Mennitt, D.J., Fristrup, K., Ogburn, E.L. and James, P. (2017). Race/ethnicity, socioeconomic status, residential segregation, and spatial variation in noise exposure in the contiguous United States. *Environmental Health Perspectives*, 125(7), 077017. https://doi.org/10.1289/EHP898

74. Choi, E., Bhandari, T.R. and Shrestha, N. (2020). Social inequality, noise pollution, and quality of life of slum dwellers in Pokhara, Nepal. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 1-12. https://doi.org/10.1080/19338244.2020.1860880

75. Hoffimann, E., Barros, H. and Ribeiro, A.I. (2017). Socioeconomic inequalities in green space quality and accessibility – Evidence from a Southern European city. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8), 916. https://doi.org/10.3390/ijerph14080916

76. Kohlhuber, M., Mielck, A., Weiland, S.K. and Bolte, G. (2006). Social inequality in perceived environmental exposures in relation to housing conditions in Germany. *Environmental Research*, 101(2), 246-255. https://doi.org/10.1016/j.envres.2005.09.008

77. Lam, K.C. and Chan, P.K. (2008). Socio-economic status and inequalities in exposure to transportation noise in Hong Kong. *Open Environmental Sciences Journal*, 2(1), 107-113. http://doi.org/10.2174/1876325100802010107

78. Nega, T.H., Chihara, L., Smith, K. and Jayaraman, M. (2013). Traffic noise and inequality in the twin cities, Minnesota. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 19(3), 601-619. https://doi.org/10.1080/10807039.2012.691409

79. Verbeek, T. (2019). Unequal residential exposure to air pollution and noise: A geospatial environmental justice analysis for Ghent, Belgium. *SSM-Population Health*, 7, 100340. https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2018.100340

80. World Health Organization (2016). Urban green spaces and health. *Copenhagen: WHO Regional Office for Europe*. https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/urban-health/publications/2016/urban-green-spaces-and-health-a-review-of-evidence-2016

81. Casey, J.A, James, P., Cushing, L., Jesdale, B.M. and Morello-Frosch, R. (2017). Race, Ethnicity, Income Concentration and 10-Year Change in Urban Greenness in the United States. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14(12), 1546. https://doi.org/10.3390/ijerph14121546

82. De Vries, S., Buijs, A.E. and Snep, R.P. (2020). Environmental Justice in The Netherlands: Presence and Quality of Greenspace Differ by Socioeconomic Status of Neighbourhoods. *Sustainability* 12(15), 5889. https://doi.org/10.3390/su12155889

83. Mitchell, R.J., Richardson, E.A., Shortt, N.K. and Pearce, J.R. (2015). Neighborhood Environments and Socioeconomic Inequalities in Mental Well-Being. *American Journal of Preventive Medicine* 49(1), 80-84. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2015.01.017

84. Wolch, J.R., Byrne, J. and Newell, J.P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and Urban Planning,* 125, 234-244. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017

85. Bild, E., Coler, M., Pfeffer, K., and Bertolini, L. (2016). Considering sound in planning and designing public spaces: A review of theory and applications and a proposed framework for integrating research and practice. *Journal of Planning Literature,* 31(4), 419-439. http://doi.org/10.1177/0885412216662001

86. Lam, K.C., Ma, W., Chan, P.K., Hui, W.C., Chung, K.L., Chung, Y.T. *et al*. (2013). Relationship between road traffic noisescape and urban form in Hong Kong. *Environmental Monitoring and Assessment,* 185(12), 9683-9695. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3282-4

87. Van Renterghem, T., Dekoninck, L. and Botteldooren, D. (2020). Multi-stage sound planning methodology for urban redevelopment. *Sustainable Cities and Society,* 62, 102362. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102362

88. Brown, A.L. and Horton, R. (2020). A planetary health perspective on COVID-19: a call for papers. *The Lancet,* 395(10230). http://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30742-X

89. Dutheil, F., Baker, J.S. and Navel, V. (2020). COVID-19 as a factor influencing air pollution? *Environmental pollution*, 263. http://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114466

90. Asensio, C., Aumond, P., Can, A., Gascó, L., Lercher, P., Wunderli, J.M. *et al*. (2020). A Taxonomy Proposal for the Assessment of the Changes in Soundscape Resulting from the COVID-19 Lockdown. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 17(12), 4205. https://doi.org/10.3390/ijerph17124205

91. Bruitparif (2020). *Les effets du confinement sur l'environnement sonore au sein de la zone dense francilienne*. 11 mai 2020. https://www.bruitparif.fr/bruitparif/

92. Asensio, C., Pavón, I. and de Arcas, G. (2020). Changes in noise levels in the city of Madrid during COVID-19 lockdown in 2020. *Journal of the Acoustical Society of America,* 148(3), 1748-1755. https://doi.org/10.1121/10.0002008

93. Aletta, F., Oberman, T., Mitchell, A., Tong, H., and Kang, J. (2020). Assessing the changing urban sound environment during the COVID-19 lockdown period using short-term acoustic measurements. *Noise Mapping* 7(1), 123-134. https://doi.org/10.1515/noise-2020-0011

94. Derryberry, E.P., Phillips, J.N., Derryberry, G.E., Blum, M.J., and Luther, D. (2020). Singing in a silent spring: Birds respond to a half-century soundscape reversion during the COVID-19 shutdown. *Science,* 370(6516), 575-579. https://doi.org/10.1126/science.abd5777

95. Kalawapudi, K., Singh, T., Vijay, R., Goyal, N. and Kumar, R. (2020). Effects of COVID-19 pandemic on festival celebrations and noise pollution levels. *Noise Mapping* 8, 89-93. https://doi.org/10.1515/noise-2021-0006

96. Lecocq, T., Hicks, S.P., Van Noten, K., Van Wijk, K., Koelemeijer, P., De Plaen *et al*. (2020). Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures. *Science*, 369(6509), 1338-1343. https://doi.org/10.1126/science.abd2438

97. Frumkin, H. (2021). COVID-19, the Built Environment, and Health. *Environmental Health Perspectives*, 129(7), 075001. https://doi.org/10.1289/EHP8888

98. Berdejo Espinola, V., Suárez Castro, A.F., Amano, T., Fielding, K.S., Oh, R.R.Y., and Fuller, R.A. (2021). Urban green space use during a time of stress: A case study during the COVID-19 pandemic in Brisbane, Australia. *People and Nature*. https://doi.org/10.1002/pan3.10218

99. Ugolini, F., Massetti, L., Calaza-Martínez, P., Cariñanos, P., Dobbs, C., Ostoić, S.K. *et al*. (2020). Effects of the COVID-19 pandemic on the use and perceptions of urban green space: An international exploratory study. *Urban Forestry & Urban Greening*, 56, 126888. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126888

100. Geary, R.S., Wheeler, B., Lovell, R., Jepson, R., Hunter, R., and Rodgers, S. (2021). A call to action: Improving urban green spaces to reduce health inequalities exacerbated by COVID-19. *Preventive Medicine*, 145, 106425. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2021.106425

101. Mell, I. and Whitten, M. (2021). Access to nature in a post Covid-19 world: Opportunities for green infrastructure financing, distribution and equitability in urban planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(4), 1527. https://doi.org/10.3390/ijerph18041527*

Графические ссылки

Измерение шума

Encyclopedia Britannica. (2021). The decibel scale. https://www.britannica.com/science/sound-physics/The-decibel-scale Accessed 30 December 2021

Hearing Health Foundation. (2021). What are safe decibels? https://hearing-healthfoundation.org/keeplistening/decibels Accessed 31 August 2021.

Münzel, T., Sørensen, M., Gori, T., Schmidt, F.P., Rao, X., Brook, J. *et al.* (2017). Environmental stressors and cardio-metabolic disease: part I-epidemiologic evidence supporting a role for noise and air pollution and effects of mitigation strategies. European Heart Journal 38(8), 550-556. https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehw269

Проверка звука: насколько шумны города?

АФРИКА

Абуджа, Нигерия – столица Алжир, Алжир – столица Кейп-Кост, Гана – Ибадан, Нигерия – Морогоро, Танзания – Найроби, Кения

Schwela, D. (2021). Environmental noise challenges and policies in low-and middle-income countries. *South Florida Journal of Health* 2(1), 26-45. https://doi.org/10.46981/sfjhv2n1-003

Каир, Египт

Abas, S. and Tamura, A. (2003). Analysis of road traffic noise level and control in Greater Cairo, Egypt. *Acoustical Science and Technology* 24(6), 358-364. https://doi.org/10.1250/ast.24.358

СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА

Атланта, США, Лос-Анджелес, США

Lee, E. Y., Jerrett, M., Ross, Z., Coogan, P. F. and Seto, E. Y. (2014). Assessment of traffic-related noise in three cities in the United States. *Environmental Research* 132, 182-189. https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.005

Монреаль, Канада

Ragettli, M. S., Goudreau, S., Plante, C., Fournier, M., Hatzopoulou, M., Perron, S. *et al.* (2016). Statistical modeling of the spatial variability of environmental noise levels in Montreal, Canada, using noise measurements and land use characteristics. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 26(6), 597-605. https://doi.org/10.1038/jes.2015.82

Нью-Йорк, США

McAlexander, T.P., Gershon, R.R. and Neitzel, R.L. (2015). Street-level noise in an urban setting: assessment and contribution to personal exposure. *Environmental Health* 14(1), 1-10. https://doi.org/10.1186/s12940-015-0006-y

Neitzel, R.L., Gershon, R.R.M., McAlexander, T.P., Magda, L.A. and Pearson, J.M. (2012). Exposures to Transit and Other Sources of Noise among New York City Residents. *Environmental Science and Technology* 46(1), 500–508. https://doi.org/10.1021/es2025406

United States of America, Department of Commerce (2019). *Commuting by public transportation in the United States: 2019.* American Community Survey Reports. U.S. Census Bureau. https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2021/acs/acs-48.pdf

Сан-Диего, США

San Diego County Government (2015). Noise Element. City of San Diego General Plan, 29 June. https://www.sandiego.gov/planning/programs/genplan. Accessed 7 July 2021

Торонто, Канада

16. Bai *et al.* 2020

17. Shin *et al.* 2020

Drudge, C., Johnson, J., MacIntyre, E., Li, Y., Copes, R., Ing, S. *et al.* (2018). Exploring night-time road traffic noise: A comprehensive predictive surface for Toronto, Canada. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 15(5), 389-398. https://doi.org/10.1080/15459624.2018.1442006

ЛАТИНСКАЯ АМЕРИКА

Богота, Колумбия – Пуэрто-Валларта, Мексика

Schwela, D. (2021). Environmental noise challenges and policies in low-and middle-income countries. *South Florida Journal of Health* 2(1), 26-45. https://doi.org/10.46981/sfjhv2n1-003

29. Dorado-Correa *et al.* (2016)

Сантьяго, Чили

Suárez, E. and Barros, J.L. (2014). Traffic noise mapping of the city of Santiago de Chile. *Science of the Total Environment* 466, 539-546. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.013

Талька, Чили

Calquín, F., Ponce-Donoso, M., Vallejos-Barra, Ó. and Plaza, E. (2019). Influence of urban trees on noise levels in a central Chilean city. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo* 51(1), 41-53. https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/2336/1709

ЕВРОПА

Барселона, Испания

2. European Environment Agency (2020)

Lagonigro, R., Martori, J. C. and Apparicio, P. (2018). Environmental noise inequity in the city of Barcelona. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 63, 309-319. https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.007

Белград, Сербия

Paunović, K., Belojević, G. and Jakovljević, B. (2014). Noise annoyance is related to the presence of urban public transport. *Science of the Total Environment* 481, 479-487. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.092

Лион, Франция

Pierrette, M., Marquis-Favre, C., Morel, J., Rioux, L., Vallet, M., Viollon, S. *et al.* (2012). Noise annoyance from industrial and road traffic combined noises: A survey and a total annoyance model comparison. *Journal of Environmental Psychology* 32(2), 178-186. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2012.01.006

Лондон, Великобритания

Smith, R.B., Beevers, S.D., Gulliver, J., Dajnak, D., Fecht, D., Blangiardo, M. *et al.* (2020). Impacts of air pollution and noise on risk of preterm birth and stillbirth in London. *Environment International* 134, 105290. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105290

Мадрид, Испания

Linares, C., Culqui, D., Carmona, R., Ortiz, C. and Díaz, J. (2017). Short-term association between environmental factors and hospital admissions due to dementia in Madrid. *Environmental Research* 152, 214-220. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.10.020

Ниш, Сербия

Prascevic, M.R., Mihajlov, D.I. and Cvetkovic, D.S. (2014). Measurement and evaluation of the environmental noise levels in the urban areas of the city of Nis (Serbia). *Environmental Monitoring and Assessment* 186(2), 1157-1165. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3446-2

Париж, Франция

Méline, J., Van Hulst, A., Thomas, F., Karusisi, N. and Chaix, B. (2013). Transportation noise and annoyance related to road traffic in the French RECORD study. *International Journal of Health Geographics* 12(1), 1-13. https://doi.org/10.1186/1476-072X-12-44

Рим, Италия

Ancona, C., Badaloni, C., Mattei, F., Cesaroni, G., Stafoggia, M. and Forastiere, F. (2017). 2053-Health impact assessment of air pollution, noise, and lack of green in Rome. *Journal of Transport & Health* 5, S42-S43. https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.05.331

Стокгольм, Швеция

Edqvist, M. and Wärnsby, M. (2014). Environmental Noise in Urban Areas - Moving towards Greater Acceptance?. *Noise & Vibration Worldwide*, 45(2). https://doi.org/10.1260%2F0957-4565.45.2.25

Тирана, Албания

Laze, K. (2017). Findings from measurements of noise levels in indoor and outdoor environments in an expanding urban area: a case of Tirana. *Noise Mapping* 4(1), 45-56. https://doi.org/10.1515/noise-2017-0003

Токат, Турция

Ozer, S., Yilmaz, H., Yeşil, M. and Yeşil, P. (2009). Evaluation of noise pollution caused by vehicles in the city of Tokat, Turkey. *Scientific Research and Essays* 4(11), 1205-1212. https://academicjournals.org/journal/SRE/article-abstract/5C0659218851

ЗАПАДНАЯ АЗИЯ

Амман, Иордания

Jamrah, A., Al-Omari, A. and Sharabi, R. (2006). Evaluation of traffic noise pollution in Amman, Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment* 120(1), 499-525. https://doi.org/10.1007/s10661-005-9077-5

Ахваз, Иран

Mohammadi, M. J., Charkhloo, E., Geravandi, S., Takdastan, A., Rahimi, S., Yari, A. R. *et al.* (2017). Road traffic noise in urban environments in Ahvaz city, Iran. *Fresenius Environmental Bulletin* 26(4), 2746-2751. https://core.ac.uk/download/pdf/211573334.pdf

Бейрут, Ливан - Дамаск, Сирия - Тебриз, Иран

Schwela, D. (2021). Environmental noise challenges and policies in low-and middle-income countries. *South Florida Journal of Health* 2(1), 26-45. https://doi.org/10.46981/sfjhv2n1-003

Ирбид, Иордания

Odat, S.A. (2015). Noise Pollution in Irbid City-Jordan. *Fluctuation and Noise Letters* 14(04), 1550037. https://doi.org/10.1142/S0219477515500376

Хеврон

Salhab, Z. and Amro, H. (2012). Evaluation Of Vehicular Noise Pollution In The City Of Hebron, Palestine. *International Journal of Modern Engineering Research* 2(6), 4307-4310. https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-Of-Vehicular-Noise-Pollution-In-The-City-Salhab-Amro/1b657b61eeee5caffeab7b7a98f8fbe5b9c750f6

Эрбиль, Ирак

Saber, S. (2014). Environmental noise with solutions: A case study. *International Journal of Advanced and Applied Sciences* 1(2), 6-14. http://www.science-gate.com/IJAAS/V1I2.html

ЮЖНАЯ АЗИЯ

Асансол, Индия – Катманду, Непал – Морадабад, Индия

Schwela, D. (2021). Environmental noise challenges and policies in low-and middle-income countries. *South Florida Journal of Health* 2(1), 26-45. https://doi.org/10.46981/sfjhv2n1-003

Дакка, Бангладеш

Riyad, R.H., Amin, A. and Mazumder, M. (2020). A Study of Noise Pollution by Traffic during Peak and Off Peak Hour in Dhaka City. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 2(2), 43-53. https://dergipark.org.tr/en/pub/jiciviltech/issue/58477/787543

Дели, Индия

Akhtar, N., Ahmad, K. and Gangopadhyay, S. (2012). Road traffic noise mapping and a case study for Delhi region. *International Journal of Applied Engineering and Technology* 2(4), 39-45. https://www.cibtech.org/J-ENGINEERING-TECHNOLOGY/PUBLICATIONS/2012/Vol_2_No_4/06-015...Nasim...Road...Region...39-45.pdf

Джайпур, Индия

Agarwal, S. and Swami, B. L. (2010). Status of ambient noise levels in Jaipur City. *Environment Conservation Journal* 11(1-2), 105-108. https://environcj.in/wp-content/uploads/issues/2010/12/105-108.pdf

Калькутта, Индия

Buragohain, D. (2020). A report on noise level status in different areas of South Kolkata, India. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science* 2(3), 395-398. https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume2/issue_3_march_2020/249/1628082963.pdf

Коломбо, Шри-Ланка

Nagodawithana, N. S., Pathmeswaran, A., Pannila, A. S., Wickramasinghe, A. R. and Sathiakumar, N. (2016). Environmental pollution by traffic noise in the city of Colombo, Sri Lanka. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* 13(3), 67-72. https://doi.org/10.3233/AJW-160028

Раджшахи, Бангладеш

Bari, M.N., Biswas, A. and Baki, A.A. (2018). *Conference: Determination of Noise Level of Different Places of Rajshahi City*. Khulna, 9-11 February 2018. Khulna University of Engineering & Technology, Bangladesh

Тангайл, Бангладеш

Hoque, M. M. M., Basak, L. K., Rokanuzzaman, M. and Roy, S. (2013). Level of noise pollution at different locations in Tangail municipal area, Bangladesh. *Bangladesh Journal of Scientific Research* 26(1-2), 29-36. https://doi.org/10.3329/bjsr.v26i1-2.20228

Фейсалабад, Пакистан – Исламабад, Пакистан - Карачи, Пакистан

Rahman Farooqi, Z. U., Nasir, M. S., Nasir, A., Zeeshan, N., Ayub, I., Rashid, H. *et al.* (2017). Evaluation and analysis of traffic noise in different zones of Faisalabad–an industrial city of Pakistan. *Geology, Ecology, and Landscapes* 1(4), 232-240. https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1389454

ВОСТОЧНАЯ АЗИЯ, ЮГО-ВОСТОЧНАЯ АЗИЯ И ТИХООКЕАНСКИЙ РЕГИОН

Бангкок, Таиланд – Кота-Бару, Малайзия – Куала-Лумпур, Малайзия

Schwela, D. (2021). Environmental noise challenges and policies in low-and middle-income countries. *South Florida Journal of Health* 2(1), 26-45. https://doi.org/10.46981/sfjhv2n1-003

Гонконг, Китай

52. Lam *et al.* (2013)

53. Cai *et al.* (2019)

Lam, K.C. and Chan, P.K. (2008). Socio-economic status and inequalities in exposure to transportation noise in Hong Kong. *Open Environmental Sciences Journal* 2(1). https:/doi.org/10.2174/1876325100802010107

To, W. M., Mak, C. M. and Chung, W. L. (2015). Are the noise levels acceptable in a built environment like Hong Kong? *Noise & Health* 17(79), 429. https://doi.org/10.4103/1463-1741.169739

Джакарта, Индонезия

Prasetyo, S., Kusnoputranto, H., Alikodra, H. and Koestoer, R. (2016). Model of noise propagation in urban area: A case study in Jakarta. *OIDA International Journal of Sustainable Development* 9(02), 45-50. https://ssrn.com/abstract=2739810

Манила, Филиппины

Dulay, L.E.R., Galvan, M.D.K.P., Puyaoan, R.J.M., Sison, A.A.Y., Natanauan, N.S. and Hernandez, P.M.R. (2018). Occupational noise exposure of traffic enforcers in selected streets in the city of Manila. *Acta Medica Philippina* 52(3). https://doi.org/10.47895/amp.v52i3.406

Мельбурн, Австралия

Hanigan, I. C., Chaston, T. B., Hinze, B., Dennekamp, M., Jalaludin, B., Kinfu, Y. *et al.* (2019). A statistical downscaling approach for generating high spatial resolution health risk maps: a case study of road noise and ischemic heart disease mortality in Melbourne, Australia. *International Journal of Health Geographics* 18(1), 1-10. https://doi.org/10.1186/s12942-019-0184-x

Окленд, Новая Зеландия

Auckland Council (2016). Noise and vibration, 8 July. https://unitaryplan.aucklandcouncil.govt.nz/HTMLSept/Part%203/Chapter%20H/6%20General/Chapter%20H%20-%206.2%20Noise%20and%20vibration.htm. Accessed 7 July 2021

Ханой, Вьетнам – Хошимин, Вьетнам

Nguyen, T.L., Nguyen, H.Q., Yano, T., Nishimura, T., Sato, T. Morihara, T. *et al.* (2012). Comparison of models to predict annoyance from combined noise in Ho Chi Minh City and Hanoi. *Applied Acoustics* 73(9), 952-959. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.04.005

Хюэ, Вьетнам

Gelb, J. and Apparicio, P. (2019). Noise exposure of cyclists in Ho Chi Minh City: A spatio-temporal analysis using non-linear models. *Applied Acoustics* 148, 332–343. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.031

Nguyen, M. K. (2014). Community response to road traffic noise in Hue City, Vietnam. *Environment and Natural Resources J* 12(2), 24-28. https://ssrn.com/abstract=3237251

Ky, N.M., Lap, B.Q., Hung, N.T.Q., Thanh, L.M. and Linh, P.G. (2021). Investigation and assessment of road traffic noise: a case study in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Water, Air, & Soil Pollution* 232, 259. https://doi.org/10.1007/s11270-021-05210-3

Управление звуковыми ландшафтами: От снижения уровня шума до желаемого звукового ландшафта

Виды и звуки

Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments. *Frontiers in Psychology* 12:570563. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.570563

Зеленые решения

Van Renterghem, T. (2019). Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise. *Urban Forestry & Urban Greening* 40. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.007

Звуковой ландшафт

Brown, L. A. (2012). A Review of Progress in Soundscapes and an Approach to Soundscape Planning. *International Journal of Acoustics and Vibration* 17(2), 73-81. https://doi.org/10.20855/ijav.2012.17.2302

Epstein, M.J. (2019). Healing the urban soundscape: reflections and reverberations. *Cities & Health* 5, 74-81. https://doi.org/10.1080/23748834.2019.1676628

Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T.T., Brown, L.A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., Lercher, P. *et al.* (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. *Building and Environment* 108, 284-294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.011

Sztubecka, M., Skiba, M., Mrówczy´, M. and Mathias, M. (2020). Noise as a Factor of Green Areas Soundscape Creation. *Sustainability* 12, 999. https://doi.org/10.3390/su12030999

Пояса деревьев

Van Renterghem, T. (2014). Guidelines for optimizing road traffic noise shielding by non-deep tree belts. *Ecological Engineering* 69, 276-286. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.029

Зеленые крыши

Nilsson, M., Klæboe, R., Bengtsson, J., Forssén, J., Hornikx, M., Van der Aa, B., Rådsten-Ekman, M. *et al.* (2013). Novel solutions for quieter and greener cities. Report of the research project “HOlistic and Sustainable Abatement of Noise by optimized combinations of Natural and Artificial means” (HOSANNA). Chalmers University of Technology. https://research.chalmers.se/en/publication/208780

Электрический транспорт

Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N. and Velasco-Sanchez, E., (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116. http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018

Cesbron, J., Bianchetti, S., Pallas, M-A., Le Bellec, A., Gary, V. and Klein, P. (2021). Road surface influence on electric vehicle noise emission at urban speed. *Noise Mapping* 8(1), 217-227. https://doi.org/10.1515/noise-2021-0017

Путь вмешательства

Brown, A.L. and van Kamp, I. (2017). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review of Transport Noise Interventions and Their Impacts on Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14, 873. https://doi.org/10.3390/ijerph14080873

Ослабление звука в источнике

Nilsson, M., Klæboe, R., Bengtsson, J., Forssén, J., Hornikx, M., Van der Aa, B., Rådsten-Ekman, M. *et al.* (2013). Novel solutions for quieter and greener cities. Report of the research project “HOlistic and Sustainable Abatement of Noise by optimized combinations of Natural and Artificial means” (HOSANNA). Chalmers University of Technology. https://research.chalmers.se/en/publication/208780

Шумовые барьеры

European Environment Agency (2020). Environmental noise in Europe — 2020. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*. https://doi.org/10.2800/686249

Звуковые барьеры из растений

Nilsson, M., Klæboe, R., Bengtsson, J., Forssén, J., Hornikx, M., Van der Aa, B., Rådsten-Ekman, M. *et al.* (2013). Novel solutions for quieter and greener cities. Report of the research project “HOlistic and Sustainable Abatement of Noise by optimized combinations of Natural and Artificial means” (HOSANNA). Chalmers University of Technology. https://research.chalmers.se/en/publication/208780

Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K., Jean, P., Defrance, J., Hornikx, M. and Kang, J. (2015). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors. *Applied Acoustics*, 92. http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.004

Экосистемные услуги

Bratman, G.N., Hamilton, J.P. and Daily, G.C. (2012). The impacts of nature experience on human cognitive function and mental health. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1249(1), 118-136. http://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06400.x

Francis, C.D., Newman, P., Taff, B.D., White, C., Monz, C.A., Levenhagen, M. *et al.* (2017). Acoustic environments matter: Synergistic benefits to humans and ecological communities. *Journal of Environmental Management* 203, 245-254. http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.041

Ratcliffe, E. (2021). Sound and soundscape in restorative natural environments. *Frontiers in Psychology* 12:570563. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.570563

Veisten, K., Smyrnova, Y., Klæboe, R., Hornikx, M., Mosslemi, M. and Kang, J. (2012). Valuation of Green Walls and Green Roofs as Soundscape Measures: Including Monetised Amenity Values Together with Noise-attenuation Values in a Cost-benefit Analysis of a Green Wall Affecting Courtyards. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 9, 3770-3788. https://doi.org/10.3390/ijerph9113770

Зеленое пространство

Alvarsson, J.J., Wiens, S. and Nilsson, M.E. (2010). Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise. *International Journal of Environment & Public Health* 7, 1036–1046. https://doi.org/10.3390/ijerph7031036

Van Renterghem, T. (2019). Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise. *Urban Forestry & Urban Greening* 40. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.007

Тихое место

Cerwén, G. (2019). Listening to Japanese Gardens: An Autoethnographic Study on the Soundscape Action Design Tool. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(23), 4648; https://doi.org/10.3390/ijerph16234648

Matsinos, G.Y., Tsaligopoulos, A. and Economou, C. (2017). Identifying the Quiet Areas of a Small Urban Setting: The Case of Mytilene. *Global NEST Journal* 19, 674–681. https://doi.org/10.30955/gnj.001817

Формирование мест

Yelmi, P. (2016). Protecting contemporary cultural soundscapes as intangible cultural heritage: sounds of Istanbul. *International Journal of Heritage Studies* 22(4), 302-311. http://dx.doi.org/10.1080/13527258.2016.1138237

Лесные пожары в условиях изменения климата

Жгучий вопрос

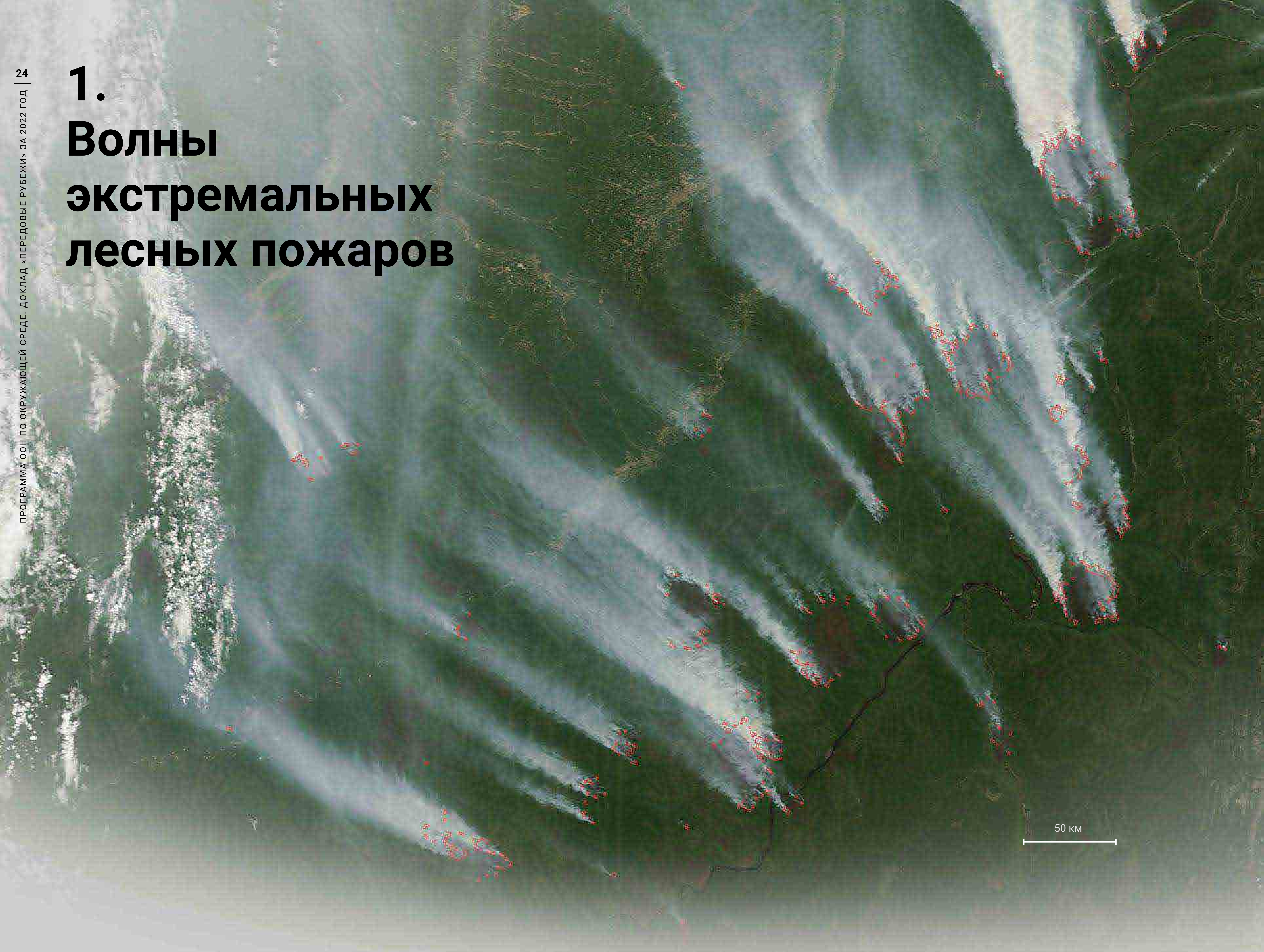
Авторы

Ливия Карвалью Моура, Институт общества, населения и природы, Бразилиа, Бразилия.
Люк Перселл, Национальный центр обмена ресурсами AFAC, Мельбурн, Австралия.
Сара Боултер, Университет Гриффита, Брисбен, Австралия.
Эндрю Дауди, Мельбурнский университет, Мельбурн, Австралия.

Рецензенты

Кристина Дель Росио Монтьель-Молина, кафедра географии Мадридского университета Комплутенсе, Мадрид, Испания.
Мэттью П. Томпсон, Исследовательская станция Роки-Маунтин, Лесная служба США, Колорадо, США.
Хуан Пабло Арганьяраз, Институт Гулича (CONAE-UNC), CONICET, Кордова, Аргентина.
Шелдон Стридом, Департамент географии и наук об окружающей среде, Школа геологопространственных наук, Северо-Западный университет, Мафикенг, Южная Африка.

1. Волны экстремальных лесных пожаров



11 июля 2012 года в центральной и восточной Сибири горело более 25 000 гектаров бореальных лесов. Неконтролируемые лесные пожары охватили территорию от Югры на западе до Сахалина на востоке. На этом спутниковом снимке видны пожары, бушующие у реки Алдан в Якутии 10 июля 2012 года.

Источник: Обсерватория Земли НАСА.

В последние годы во многих регионах мира произошли разрушительные лесные пожары, последовавшие за периодами сильной жары и засухи. Многие новости посвящены уничтожающим города лесным пожарам в северном полушарии, например, во время необычайного сезона пожаров 2020 года на западе США[1]. В 2021 году масштабная эвакуация населения с греческого острова Эвбея принесла западающие в душу образы того, что, по мнению исследователей, будет становиться все более частыми событиями в средиземноморских странах[2].

Катастрофические лесные пожары бушуют и на глобальном Юге. В 2019-2020 годах Австралия пережила беспрецедентные пожары «Черного лета». По всему миру транслировались новости и шокирующие кадры[3]. Несмотря на то, что в этой стране пожары далеко не в новинку, масштабы и интенсивность пожаров «Черного лета» привлекли внимание к тому, каким образом глобальное потепление увеличивает риск лесных пожаров[4-7]. Пожары охватили более 24 миллионов гектаров, тысячи домов были разрушены, 33 человека погибли[3]. Массовые пожары 2019-2020 годов уничтожили жизненно важные места обитания сотен видов, в том числе тех, которые уже находятся под угрозой исчезновения[8].

За последние десятилетия в Латинской Америке быстрое и повсеместное обезлесение саванн и тропических лесов, усугубляемое засухами и ограничениями существующей политики контроля за пожарами, привело к катастрофическим лесным пожарам[9-11]. В Боливии, Бразилии, Колумбии, Парагвае и Перу в 2019 году сгорело более 6 миллионов гектаров в регионах Чикитания, Серрадо и Амазонка, в основном в пределах охраняемых территорий с местной растительностью[12,13]. По этому району разрушительная волна лесных пожаров прокатилась во время засушливого сезона 2020 года[14,15]. В течение всего года на спутниковых снимках по всей Африке видны пожары, которые составляют огромные выгоревшие площади на записях наблюдения и мониторинга[15].

«Прогнозируется, что наблюдаемые тенденции все более пожароопасных погодных условий будут продолжать усиливаться из-за роста концентрации парниковых газов в атмосфере и возрастания факторов риска».

По всем континентам и биомам эти экстремальные лесные пожары похожи основными факторами риска, опасностями и последствиями для общества и окружающей среды. Долгосрочные последствия для физического и психического здоровья не ограничиваются только теми людьми, кто борется с лесными пожарами, эвакуируется или несет большие потери[16-20]. Дым и твердые частицы от лесных пожаров наносят серьезный ущерб здоровью людей в населенных пунктах с подветренной стороны, иногда за тысячи километров от их источника[21-23]. Исследования показывают, что наиболее уязвимые группы населения — женщины, дети, пожилые люди, инвалиды и малоимущие — страдают от воздействия лесных пожаров больше всего. Это подтверждает общепризнанное понимание того, что последствия этих пожаров такие же, как и у большинства стихийных бедствий[24,25].

Наблюдаемые тенденции к формированию более пожароопасной погоды, вероятно, будут продолжать усиливаться из-за увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере и сопутствующего увеличения факторов риска экстремальных лесных пожаров[4,6,26-34]. Помимо изменений климата, повышение интенсивности некоторых лесных пожаров может быть связано с изменениями в землепользовании и в подходах к контролю пожаров, которые не учитывают тесную взаимосвязь между растительностью и огнем, сложившуюся на протяжении тысячелетий[11,35-38].

С усугублением последствий жаркого климата, которое продлевает сезоны пожаров и может привести к увеличению случаев естественного возгорания, изменений в землепользовании, которые увеличивают запасы горючего топлива и риски воспламенения, а также с увеличением числа населенных пунктов, построенных на границе между нетронутыми территориями и городами, предстоит решить серьезные проблемы того, как нам жить с огненным компонентом занимаемых нами экосистем.

Выгоревшие за последние два десятилетия территории

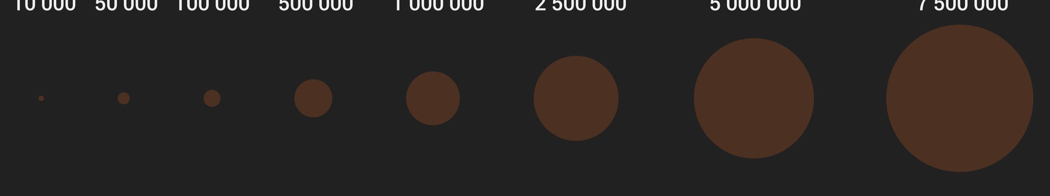
На этой диаграмме показаны глобальные модели выгоревших площадей с 2000 по март 2021 года с использованием данных дистанционного зондирования, полученных с помощью спектрорадиометра НАСА с умеренным разрешением (MODIS).

С 2002 по 2016 год ежегодно выгорало около 423 миллионов гектаров земной поверхности, причем большая часть (67 %) пришлась на Африку[39]. Соответствующий анализ показал, что с 2003 по 2016 год в мире произошло более 13 миллионов отдельных пожаров, каждый из которых длился 4-5 дней[15]. В среднем каждое возгорание сжигало площадь в 440 гектаров по всему миру, в то время как в Австралии отдельные пожары сжигали до 1790 гектаров[15].

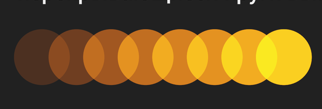
Данные включают все типы обнаруженных выгоревших территорий, включая пахотные земли, пастбища и природную растительность, независимо от источника возгорания, типа пожара или причины возгорания.

Источник данных: ежемесячный отчет MODIS о выгоревших территориях (MCD64A1 v006) общедоступен для загрузки с сайта Global Forest Watch (https://globalforestwatch.org/topics/fires)

Площадь пожаров в гектарах



Размер каждого круга отражает еженедельные данные о площади пожаров. Общая выгоревшая площадь рассчитывается путем сложения ежедневных показателей, при этом многодневные пожары за определенный период времени подсчитываются несколько раз, благодаря чему перекрывающиеся круги выглядят ярче.



Сгруппировано по общей площади пожаров

Тенденция к увеличению числа лесных мегапожаров в года, когда выгорело более одного миллиона гектаров, начиная с 2000 года связана с участившимися пожароопасными погодными условиями, включая частые случаи возникновения пожароопасных гроз и возгорания от сухой молнии.

Ежегодно выгорает 30 процентов суши Анголы, при этом наиболее серьезные последствия наблюдаются в районах с высокой долей лесов и небольшой долей естественных кустарников и лугов. Практика вырубки леса под пастбища способствовала более интенсивным пожарам в сухой сезон.

Бразильская саванна, или серрадо, занимает около 23 процентов общей площади суши и является вторым по величине биомом после тропических лесов Амазонки (48 %). В засушливый сезон частота и концентрация пожаров в серрадо увеличились, возникая теперь каждые два-три года, например, в 2004, 2007, 2010, 2012, 2015 и 2017 годах.

70-90 процентов общей площади пожаров в России приходится на Сибирь, причем большинство сибирских лесных пожаров происходит в лесах с преобладанием лиственницы. На юге Сибири сильные пожары 2003 года в лиственничных лесах, покрытых вечной мерзлотой, были вызваны низкой поверхностной влажностью и отсутствием осадков в предыдущем году, а также повышенными температурами в начале 2003 года.

Необычные пожары в 2004 году в Боливии были связаны с последствиями засухи и вырубки лесов.

Согласно исследованию долгосрочных тенденций, лесные пожары 2005 года в Парагвае были связаны с увеличением масштабов обезлесения.

Рекордное количество лесных пожаров в 2011 году в Мексике, скорее всего, было связано с длительными периодами засухи из-за снижения количества зимних дождей в предыдущем году.

Обширные выгоревшие площади в бореальных лесах Северо-Западных территорий Канады в 2014 году и на Аляске в США в 2015 году объясняются рекордным количеством возгораний от молний, вызванных изменением климата.

В центральной части Чили возникновению крупных пожаров в пожароопасный сезон 2016-17 годов способствовали превращение местных лесов в районы с легковоспламеняющейся растительностью и устойчивая мегазасуха.

* Южный Судан получил независимость от Судана 9 июля 2011 года. Данные о площади пожаров до указанной даты были сопоставлены с нынешними линиями границ обеих стран.

Полный список литературы см. на стр. 38.

2. Влияние человека на лесные пожары

13 июня 2020 года в результате пожара автомобиля возле шоссе в Фениксе, штат Аризона, США, загорелась растительность, что за три дня привело к уничтожению огнем 26 000 гектаров.

На спутниковом снимке, полученном с помощью Operational Land Imager (OLI) на Landsat 8, видны выгоревшие участки и несколько активных фронтов пожаров, появившихся 14 июня 2020 года. Сочетание природных цветов с характерными инфракрасными признаками активного горения улучшает обнаружение продолжающихся пожаров по дыму.

Источник: Обсерватория Земли НАСА.

Лесные пожары — это естественная особенность земной системы, необходимая для функционирования многих экосистем. Взаимодействия между растительностью и климатом в течение длительных периодов определяют в каждой экосистеме особую модель повторяемости лесных пожаров, известную как ее режим пожаров[40]. Отклонения от преобладающего режима пожаров — по времени, частоте, размаху и интенсивности лесных пожаров — могут привести к значительным экологическим изменениям как в зависящих от пожаров экосистемах, которым пожары необходимы для процветания, так и в чувствительных к пожарам экосистемах, где последствия пожаров носят скорее негативный, чем позитивный характер[37,41-45].

Прямо или косвенно люди влияют на режимы пожаров, изменяя ландшафты и их растительность, разжигая пожары в качестве практики управления земельными ресурсами там, где естественные пожары возникают редко, подавляя и предотвращая пожары для защиты человеческих сообществ, а также изменяя климат[42]. Расчистка земель, вырубка лесов, расширение сельскохозяйственных угодий, добыча ресурсов, развитие городов и сельских районов — все это является ключевыми изменениями в землепользовании, которые могут нарушать режимы естественных пожаров[41].

Влажные тропические леса, чувствительные к пожарам, редко горят естественным путем, потому что в такой влажной среде с влажной растительностью пожары возникают редко[45]. Теперь лесные пожары стали более частым явлением в некоторых регионах, где они ранее не ожидались, в том числе из-за изменений климата, а также других факторов, таких как реформы в землепользовании и обезлесение. В тропических лесах Амазонки пожары устраивают люди: местная растительность вырубается, наиболее ценная древесина отбирается и вывозится, а останки оставляют сохнуть до тех пор, пока обломки преднамеренно не подожгут, чтобы освободить место для ферм и пастбищ[10,11]. Фрагментация леса и возможное разделение на саванну и пастбища создают благоприятные условия для будущих лесных пожаров, что приводит к безвозвратной утрате экосистемы тропических лесов[46].

Еще одной важной формой изменения землепользования и трансформации ландшафта является растущая урбанизация по мере того, как города расширяются, захватывая нетронутые территории. Во многих регионах за последние десятилетия произошло быстрое распространение городской территории в сторону лесных массивов[47]. На границе между городами и природными землями опасность лесных пожаров наиболее высока[48].

К целому ряду проблем могут привести неправильная политика контроля пожаров, в том числе агрессивное тушение пожаров, а также низкое признание традиционных методов профилактики лесных пожаров и борьбы с ними и местных знаний[11,49-51]. В некоторых других случаях попытки устранить пожары в экосистемах, в том числе зависящих от пожаров, могут привести к накоплению запасов топлива и связанному с этим увеличению риска воспламенений[52-55]. Политика контроля пожаров, подобная этой, может привести к изменению режима пожаров с тем, что более крупные и частые лесные пожары будут становиться все более распространенными[37,56].

В последние десятилетия укреплению экологического здоровья и предотвращению более крупных и разрушительных неконтролируемых пожаров в экосистемах способствует растущее признание необходимости системного и комплексного ландшафтного подхода, интегрированного с культурной и экологической значимостью управления землями коренных народов[57,58]. Например, позитивные результаты показали инициативы по контролю пожаров в австралийских саваннах, которые включали местные методы управления лесными пожарами с измерением и отслеживанием последствий профилактического сжигания лесорубочных остатков[57]. Этот подход дал вдохновляющие примеры для других стран, включая экосистемы Серрадо в Бразилии и саванны в Ботсване[59].

Лесные пожары в эпоху антропоцена

Экология пожаров

Что такое лесной пожар?

Лесной пожар – это пожар со свободно горящими растениями, в том числе пожары, которые могут представлять значительный риск для социально-экономических или экологических ценностей. Он может начаться по злому умыслу, случайно или естественным путем[38].

Лесной пожар может быть кратковременным и небольшим по площади, но чаще всего он горит в течение длительного периода времени и на большой территории. Поведение лесного пожара может быть в основном безобидным по всему периметру, но иногда для него характерны периоды быстрого распространения фронта и интенсивного горения, против чего попытки тушения и другие меры по снижению риска могут оказаться неэффективными. Последствия лесного пожара могут проявиться немедленно или через некоторое время после того, как огонь потушен[38].

Несмотря на то, что лесные пожары могут возникать естественным путем, большинство из них являются результатом таких действий человека, как расчистка земель после промышленной вырубки лесов и для нужд сельского хозяйства или под населенные пункты, управление пастбищами для выпаса скота и халатность[38].

В зависимости от взаимодействия между растительностью и климатом, лесные пожары обычно ведут себя в соответствии со схемой, характерной для окружающей экосистемы и известной как *режим пожаров*. Характеристики режима пожаров включают частоту, степень, интенсивность, тяжесть и сезонность горения.

Лесные пожары могут возникать естественным путем при сочетании трех элементов:

Возгорание
Вспышка от солнечного тепла или удара молнии, достаточная для возникновения огня

Топливо
Достаточное количество горючих материалов для поддержки пламени

Погода
Такие окружающие условия, как температура, ветер или относительная влажность, способные обеспечить распространение огня

Лесной пожар и экосистемы

Лесные пожары играют ключевую роль в поддержании экологических функций и биоразнообразия. Многие экосистемы эволюционировали таким образом, что включают регулярные лесные пожары и зависят от них для поддержания своего здоровья. Например, некоторым растениям нуждаются в регулярных пожарах, вызывающих прорастание и сжигающих конкурирующую растительность. Поскольку в данной среде обитания есть виды, которые приспособились к определенному режиму пожаров, любое изменение может повлиять как на эти виды, так и на экосистему в целом.

Виды лесных пожаров

В зависимости от свойств топлива из биомассы и погодных условий существует три вида лесных пожаров. В одном пожаре могут проявляться все три вида пожаров или их комбинация.

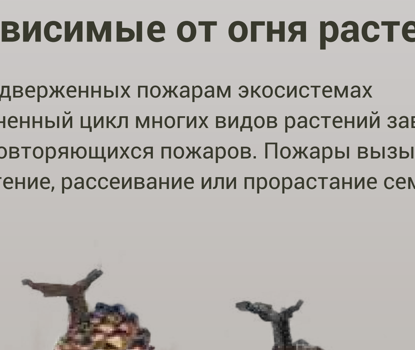
Верховые пожары
Они поднимаются от земли к кронам деревьев и могут распространяться по пологу леса. Они обычны для лесов со средиземноморским климатом и бореальных лесах. Это самые интенсивные и опасные лесные пожары, которые зачастую труднее всего потушить. Их распространение обычно требует больших объемов доступного топлива и сильных ветров.

Подземные (почвенные) пожары
Они сжигают разложившиеся органические подповерхностные слои почвы и обычно не вызывают видимого пламени. Трудно поддающиеся полному тушению подземные пожары могут тлеть в течение зимы и вновь возникнуть весной. Наиболее распространены на торфяниках и болотах и могут перерастать в низовые пожары.

Низовые пожары
Они сжигают опавшие листья, отмерший материал и растительность на земле. Преобладают и часто встречаются на лугах и в саваннах с высокой продуктивностью. Распространены также в редколесьях и лесах, где основным топливом является лесная подстилка. Низовые пожары могут распространяться вертикально, зажигая кустарники и заросли, превращаясь в верховые пожары.

Зависимые от огня растения

В подверженных пожарам экосистемах жизненный цикл многих видов растений зависит от повторяющихся пожаров. Пожары вызывают цветение, рассеивание или прорастание семян[36].



Некоторые виды, распространенные в бореальных лесах и регионах со средиземноморским климатом, годами хранят семена в шишках, пока пожар не спровоцирует их выброс.

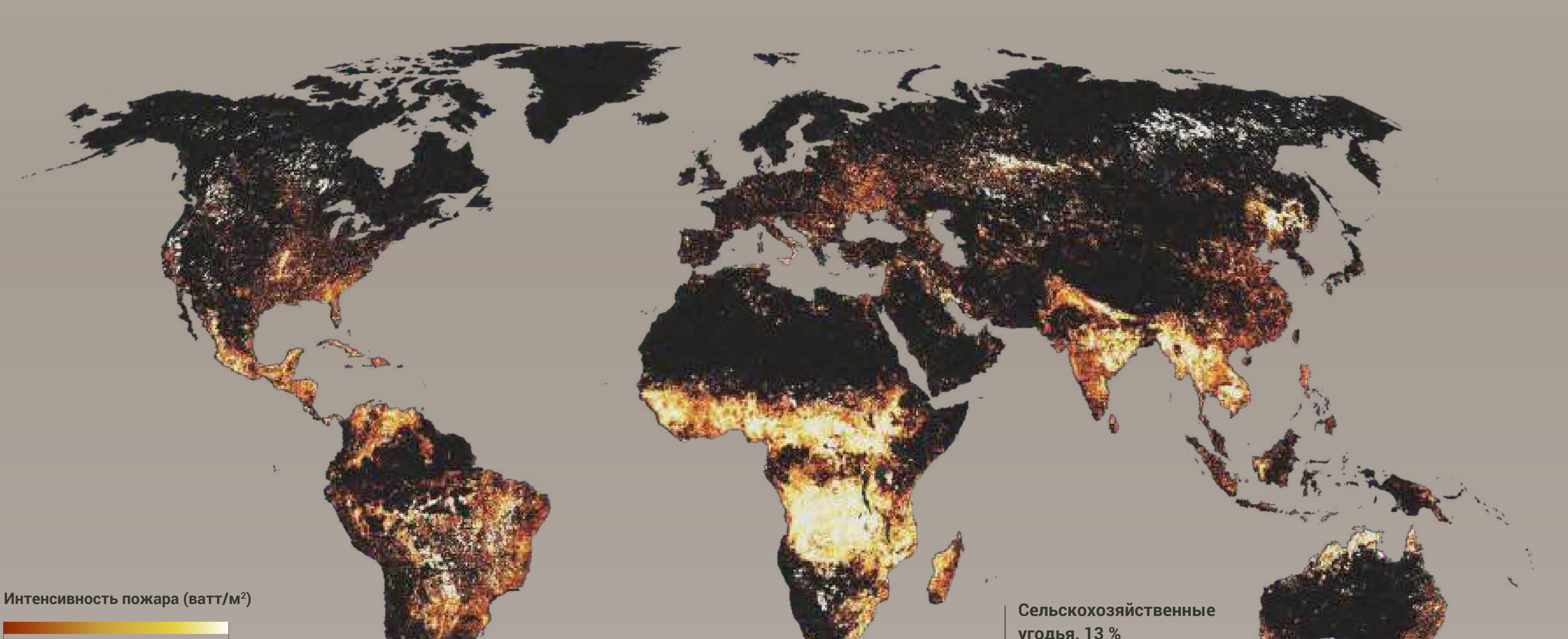
Лесные пожары стимулируют цветение таких луковичных растений, как орхидеи и лилии, а также многолетних трав.

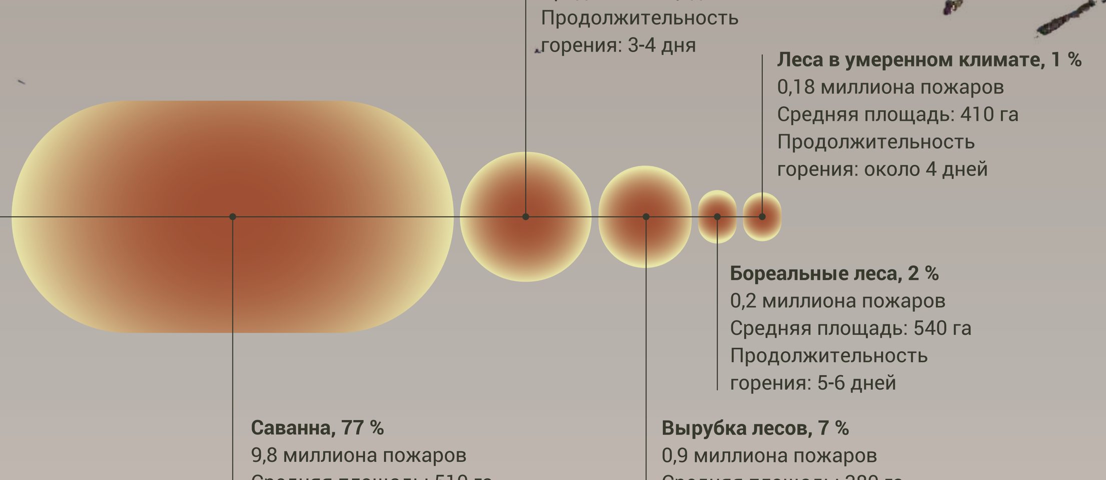
Дым и обугленная древесина также могут вызвать прорастание семян у многих подверженных пожарам видов кустарников.

Где горит огонь

На карте показаны активные пожары всех типов, наблюдавшиеся с 1 января по 20 сентября 2021 года. Изображение было создано путем объединения стоп-кадров, извлеченных из замедленной видеосъемки активных пожаров НАСА. Для лучшего просмотра динамических изменений интенсивности огня во времени перейдите на сайт студии визуализации научных данных НАСА.

Смотреть замедленную видеосъемку





Количество выявленных пожаров за 2003-2016 гг.

С 2003 по 2016 год в мире произошло более 13 миллионов отдельных пожаров со средней продолжительностью от 4 до 5 дней, в зависимости от континента и обстоятельств[15]. Средняя площадь пожаров в каждом случае составила 440 га[15].

Режимы пожаров меняются

Изменение режимов пожаров в отдельных биомах

Таблица, адаптированная по материалам Bowman *et al.* (2011)[35], показывает, как изменились режимы пожаров в отдельных биомах от низких до высоких широт после глобальной индустриализации.

Биом	Тропический лес	Тропическая саванна	Пустыни средних широт	Сезонно засушливые леса средних широт Северной Америки	Бореальный лес
Доиндустриальные режимы пожаров	Очень редкие низовые пожары малой интенсивности с незначительными долгосрочными последствиями для биоразнообразия	Частые пожары в сухой сезон, вызывающие пространственную неоднородность плотности роста деревьев	Нечастые пожары после влажных периодов, способствующие накоплению топлива	Частые малоинтенсивные поверхностные пожары, ограничивающие рост деревьев	Нечастые высокоинтенсивные верховые пожары, вызывающие замену целых лесных массивов
Постиндустриальные режимы пожаров	Частые низовые пожары, связанные с вырубкой леса и приводящие к переходу на легковоспламеняющиеся пастбища или сельскохозяйственные поля	Уменьшение пожаров из-за интенсивного выпаса скота, что привело к увеличению численности древесных пород	Частые пожары из-за заноса чужеродных легковоспламеняющихся трав	Тушение пожаров, вызывающее высокую плотность молоди и нечастые высокоинтенсивные пожары в кронах деревьев	Увеличение числа лесных пожаров высокой интенсивности, связанное с глобальным потеплением, что приводит к потере почвенного углерода и переходу к безлесной растительности

Источник: Адаптировано по материалам Bowman *et al.* (2011)[35]. Публикуется с разрешения John Wiley и Sons Ltd.

Фото сезонно засушливого леса в средних широтах Северной Америки: kenkistler / Shutterstock.com

Изменение землепользования

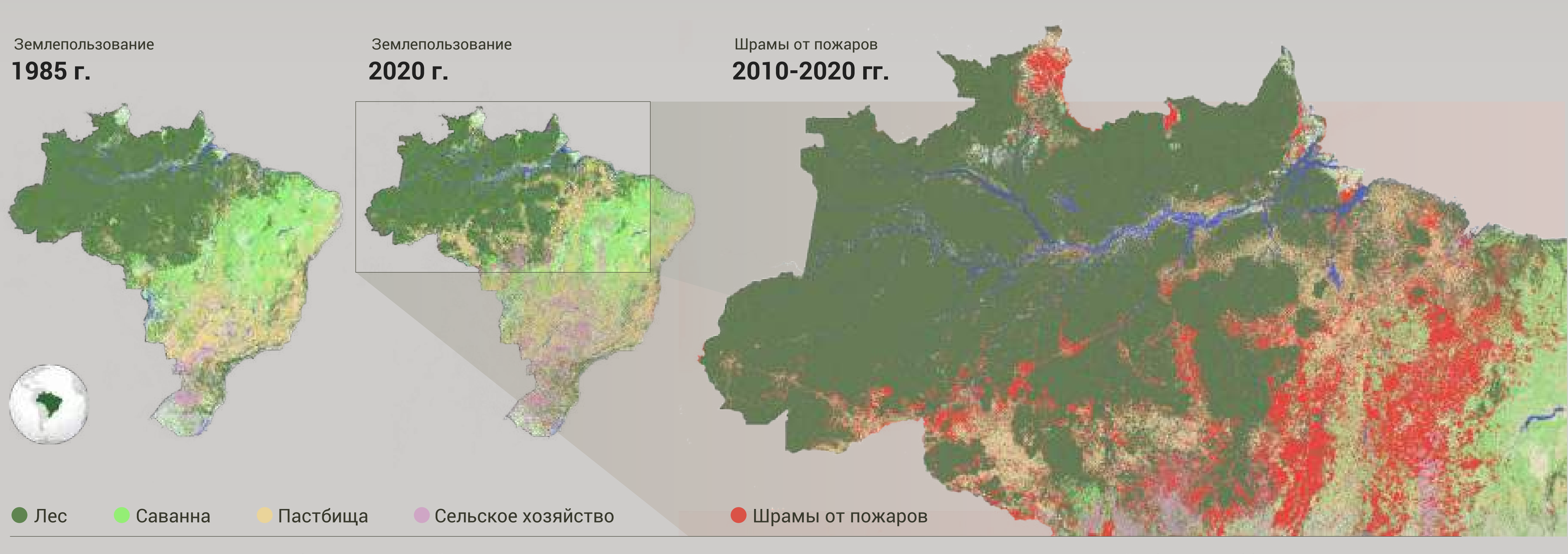
Изменения в землепользовании, связанные с сельским хозяйством, вырубкой лесов и развитием городов, приводят к существенным изменениям характера пожаров в самых разных экосистемах[35].

Люди часто используют пожары для управления территорией, где лесные пожары случаются редко, или тушат пожары там, где лесные пожары распространены. Преобразование земель с естественной растительностью изменяет свойства топлива, что может привести к более серьезному или более частому возникновению лесных пожаров.

Сокращение по всему Средиземноморью эксплуатации пастбищ превратило их в легковоспламеняющиеся кустарники[36].

В тропических лесах, где большинство видов не приспособились к быстрому восстановлению после пожаров, лесные пожары часто используют для преобразования лесов в ранчо и сельскохозяйственные угодья. Такая расчистка земель изменяет режимы пожаров в местном масштабе, что приводит к широкомасштабному преобразованию экосистемы[41].

В Бразилии такие перемены в землепользовании, как вырубка лесов и сельское хозяйство, привели к увеличению числа пожаров по всей стране, в том числе в районе тропических лесов Амазонки, где раньше пожары были редкостью.



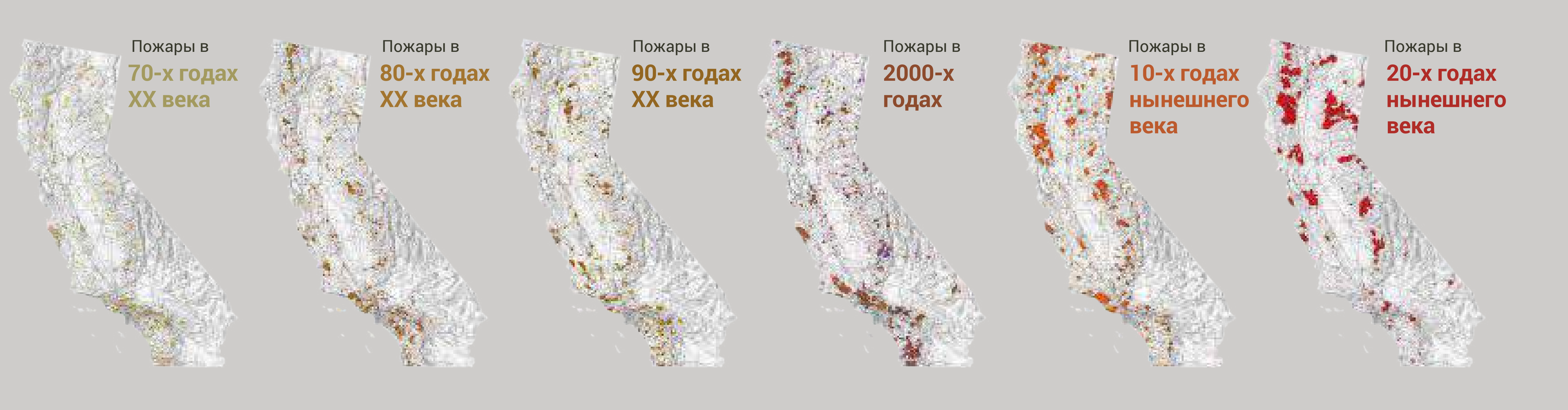
Источник: сборник 6 проекта MapBiomas, ежегодной серии карт землепользования и растительного покрова Бразилии доступен на сайте http://mapbiomas.org. Проект MapBiomas – это межотраслевая инициатива для создания ежегодных карт землепользования и растительного покрова на основе автоматических процессов классификации, применяемых к спутниковым снимкам.

Увеличение линии взаимодействия между дикой природой и городскими районами

Городское развитие на стыке дикой природы и городскими районами требует управления рисками пожаров и их энергичного тушения, что приводит к изменениям в режимах естественных пожаров[42].

Не только освоение земель меняет растительный покров, но и политика тушения и недопущения пожаров, направленная на защиту человеческих жизней и собственности, приводит к скоплению топлива и сильным пожарам после его воспламенения[35,37].

За последние десятилетия площадь пожаров и средний размер лесных пожаров в Калифорнии (США) увеличились. Стремительная урбанизация на окраинах лесов, накопление топлива из биомассы в результате многолетнего тушения пожаров, а также экстремальная засуха и жара, усугубляемые изменением климата, способствуют резкому увеличению числа крупных пожаров.



Источник: земная обсерватория НАСА (https://earthobservatory.nasa.gov/images/148908/whats-behind-californias-surge-of-large-fires).

Огонь и инвазивные виды

Деятельность человека в значительной степени ответственна за занос инвазивных видов, которые могут менять режимы пожаров, изменяя структуру растительности в экосистеме, количество и свойства топлива[37].

Измененные режимы пожаров могут создавать условия, непригодные для восстановления естественной растительности после лесного пожара, но подходящие для процветания инвазивных огнеустойчивых видов.

Во многих экорегионах США занос некоторых неместных трав увеличил количество пожаров на 230 процентов, а частоту пожаров – на 150 процентов[44].

Многие инвазивные виды трав обладают высокой топливной биомассой и низкой влажностью, что создает благоприятные условия для лесных пожаров. Семена некоторых из наиболее успешных инвазивных видов трав прорастают под действием тепла и дыма.

3. Изменение климата, изменение пожароопасной погоды

В ноябре 2019 года к северу от Сиднея (Австралия) бушевали многочисленные лесные пожары, при этом густой дым тянулся в сторону прибрежных городов Кофс-Харбор и Порт-Маккуори. Качество воздуха в пострадавших городах достигло опасного уровня. Рекордные температуры, сильный ветер и длительное отсутствие осадков привели к массовым лесным пожарам в штате Новый Южный Уэльс.

Источник: земная обсерватория НАСА.

Во всем мире из-за антропогенного изменения климата многие виды экстремальных погодных явлений в настоящее время носят более интенсивный характер и происходят чаще, чем в прошлом[27,28]. Долгосрочные тенденции потепления показывают, что в настоящее время в 41 из 45 регионов мира большая часть года более жаркая, чем те, которые наблюдались до 1950 года[28]. Более высокие температуры в сочетании с участившимися засухами приводят к увеличению продолжительности пожароопасных сезонов и повышению вероятности возникновения пожароопасных погодных условий[1,26-34,60,66].

Проведенные в западной части Северной Америки исследования показывают, что аномальная жара и многолетние засухи не только способствуют увеличению числа лесных пожаров, но усиливают их интенсивность и охватывают все большие территории[30,34,61]. Сильные и длительные засухи и более высокие температуры воздуха в Южной Америке связаны с учащением пожаров и повышением их тяжести во влажных тропических районах и сезонно затопляемых водно-болотных угодьях, включая районы, где лесные пожары ранее были беспрецедентными явлениями[14,62-65]. С конца 90-х годов XX века в умеренном климате Австралии количество осадков в период, предшествующий сезону пожаров, снизилось более чем на 10 процентов[67]. Согласно данным за более чем 100-летний период, 2019 год был самым жарким и засушливым годом в Австралии за всю историю наблюдений[5,66,67]. Результаты проведенных исследований в Чили, Новой Зеландии и некоторых частях Африки также показали влияние изменения климата на усиление засухи и лесных пожаров[62,68-71]. В Южной Европе и Средиземноморье изменение климата также повышает вероятность формирования пожароопасных погодных условий, поскольку весь бассейн переходит в более засушливую систему[2,28,35,72,73].

> «Из-за антропогенного изменения климата во всем мире многие типы экстремальных погодных явлений в настоящее время более интенсивны и происходят чаще, чем раньше. Более высокие температуры в сочетании с большим количеством засух приводят к увеличению продолжительности пожароопасных сезонов и повышению вероятности возникновения пожароопасных погодных условий».

Молния является важной естественной причиной лесных пожаров, поэтому, по прогнозам, частота ударов молнии в некоторых частях мира будет увеличиваться по мере изменения климата[74-81]. В последние годы причиной выгорания большей части бореальных лесов Северной Америки являются удары молнии, вызванные изменением климата[82]. В некоторых районах юго-востока Австралии в последние десятилетия было зарегистрировано также увеличение частоты сухих молний – тип молний, возникающих при небольшом количестве осадков или вообще без них – в то время как в некоторых районах наблюдалось снижение их количества[83]. От общей площади, выгоревшей в результате лесных пожаров, значительная доля обусловлена ударами молний, поскольку они могут возникать в разные промежутки времени и на разных участках, включая отдаленные регионы, до которых трудно добраться со средствами реагирования[74].

Другим явлением, о котором в последние десятилетия участились сообщения в Австралии и Северной Америке, являются вызванные пожаром грозы[4,6,84-89]. Характерные для более экстремальных пожаров, эти грозы образуются в дымовых шлейфах пожаров, формируя так называемые кучево-дождевые облака. В некоторых частях южной Австралии со временем учащаются погодные условия, при которых возникают вызванные пожарами грозы, и, согласно прогнозам, такая тенденция сохранится[4,77,86,90]. Вызванные пожарами грозы будут усугублять пожароопасные условия на земле, в том числе нестабильную скорость ветра и изменения его направления, а также возникновение молний, способных вызывать новые возгорания далеко за пределами фронта пожара[85]. Они иллюстрируют риск формирования петли опасной обратной связи между огнем и атмосферными процессами.

Ключевым фактором, повышающим интенсивность пожаров в условиях неопределенного влияния изменения климата, является наличие доступного топлива из биомассы. Масса такого топлива может увеличиться, когда более высокие концентрации углекислого газа над поверхностью земли выступают в роли удобрения и способствуют росту определенных видов растений[91-93]. В то время как объем органического материала может увеличиваться, более низкая относительная влажность превратит большую его часть в сухое топливо для лесных пожаров. В некоторых случаях топливная нагрузка увеличивалась также из-за практики предотвращения лесных пожаров[26,94]. В целом улучшение понимания пожарозависимых экосистем и экологии пожаров способствует переходу к комплексному контролю над пожарами, включая использование контролируемых и профилактических сжиганий в соответствующее время и в правильных условиях для снижения топливной нагрузки[42,95].

В то время как изменение климата уже влияет на лесные пожары, лесные пожары также могут влиять на изменение климата[28,96,97]. Двумя возможными факторами, которые потенциально могут ускорить изменение климата, считаются исчезновение тропических лесов Амазонки и таяние вечной мерзлоты в Арктике[28,98,99]. Недавние исследования показали, что вырубка лесов в Амазонии превращает этот регион из поглотителя углерода в источник углерода, а в сибирской Арктике ускоряется таяние вечной мерзлоты, причем в обоих случаях этому способствуют пожары[87,88,100].

Изменение климата:

пожароопасная погода становится все более экстремальной

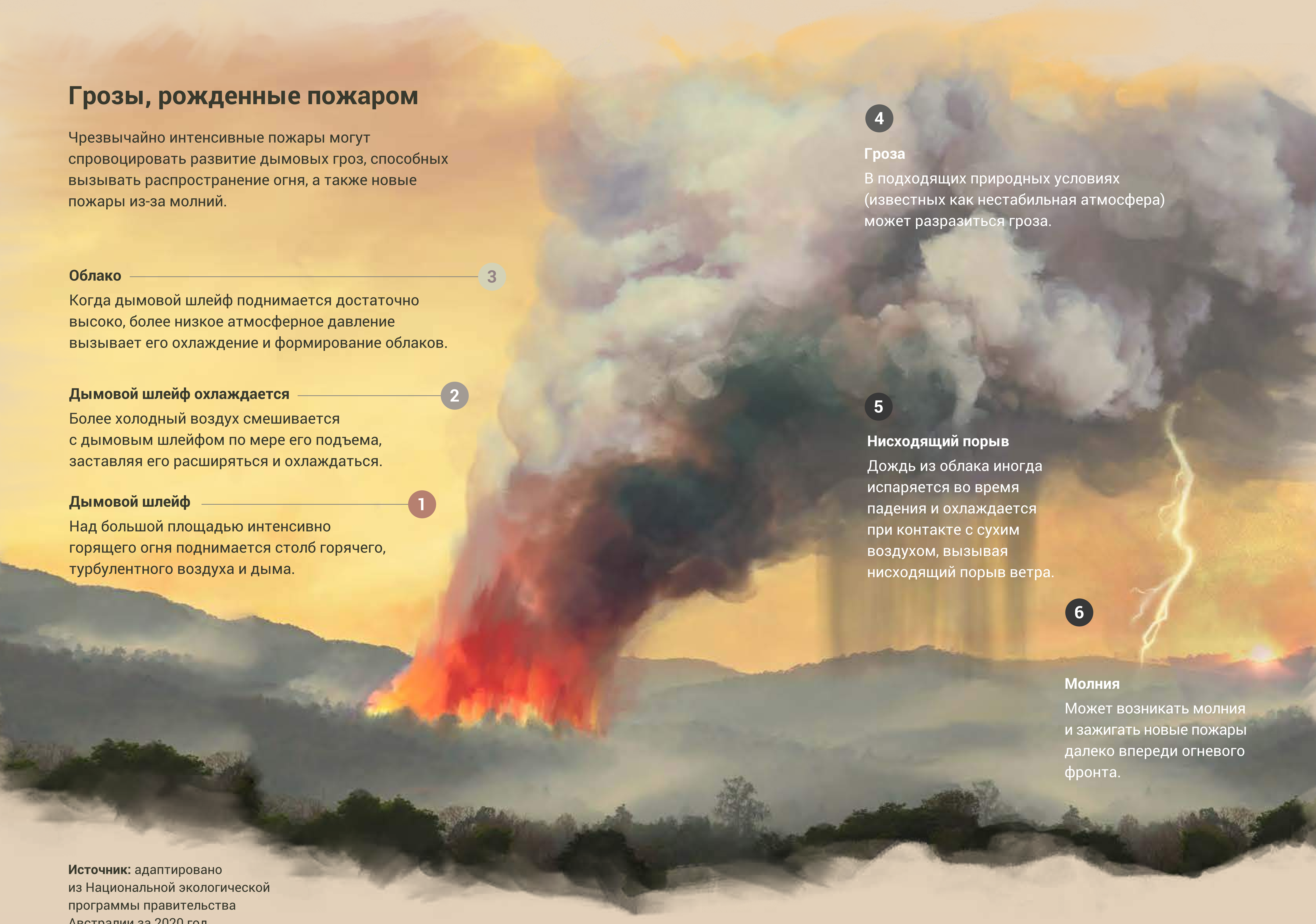
Изменение климата увеличивает риск возникновения крупных и более интенсивных пожаров[5,6,42]. Климат напрямую влияет на производство и состояние биомассы, а также на погоду, которая способствует возгоранию и распространению огня. В месяцы, предшествующие сезону пожаров, продолжительная теплая и сухая погода снижает влажность растительности, увеличивая риск возникновения возгораний, которые могут перерасти в лесные пожары и распространиться. Напротив, необычно большое количество осадков увеличивает рост растений, которые в следующем засушливом сезоне могут послужить топливом. Крупные пожары в лесных экосистемах возникают во время длительных засух, например, в регионах, подверженных колебаниям Эль-Ниньо[5,36].

Возгорание от молнии

Молнии является важным естественным источником возникновения лесных пожаров. По прогнозам, по мере изменения климата в некоторых частях мира удары молнии будут учащаться. Возгорание от молнии является основной причиной массовых лесных пожаров в бореальных лесах Северной Америки и северной Сибири[60].

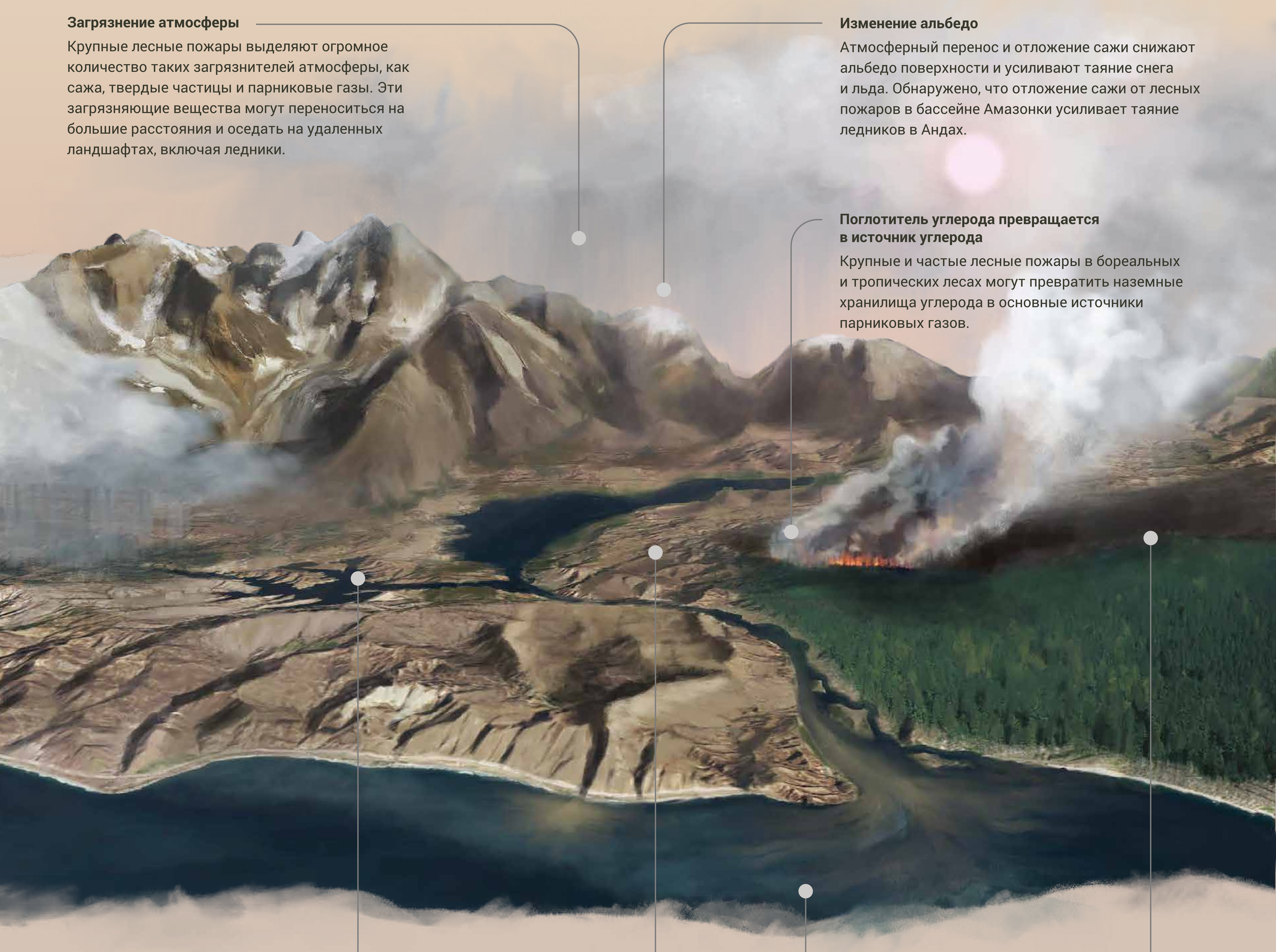
Грозы, рожденные пожаром

Чрезвычайно интенсивные пожары могут спровоцировать развитие дымовых гроз, способных вызывать распространение огня, а также новые пожары из-за молний.



Источник: адаптировано из Национальной экологической программы правительства Австралии за 2020 год.

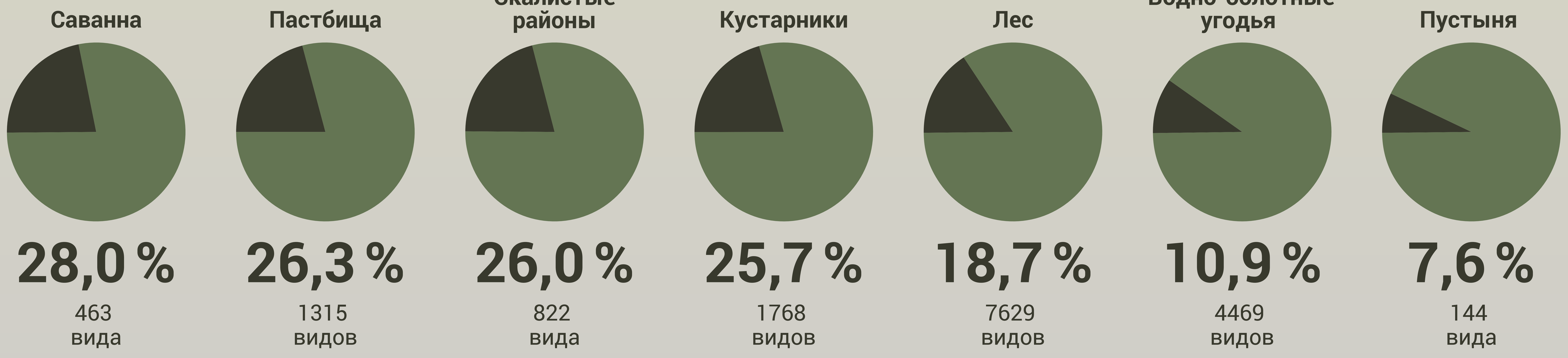
Воздействие экстремальных лесных пожаров на систему Земли



Полный список литературы см. на стр. 40.

Виды, находящиеся под угрозой из-за изменения режимов пожаров

Процент видов, находящихся под угрозой из-за изменения режимов пожаров, включая ликвидацию пожаров, по местам обитания



Источник: Kelly *et al.* (2020). Полный список литературы см. на стр. 40.

4. Улучшение управления лесными пожарами перед лицом дальнейших изменений климата

По мере того, как растут потери и ущерб от экстремальных лесных пожаров, все большее внимание привлекает необходимость как их предотвращения, так и управления мерами реагирования. По мере усиления антропогенного изменения климата угрозы будут только возрастать, в том числе в тех случаях, когда изменения в землепользовании не соответствуют передовым методам сохранения устойчивости экосистем и целостности ландшафта.

В то время как практика развитых стран часто делает упор на предотвращение пожаров, многие развивающиеся страны не имеют потенциала для борьбы с пожарами, помимо реагирования на ситуации, когда стихийное бедствие становится непосредственной угрозой жизни и имуществу. Эффективное управление пожарами важно для таких пожарозависимых экосистем, как саванны и пастбища, где запасы топлива накапливаются и повышают риск пожаров, особенно в разгар засушливого сезона[53]. Запасы топлива, накопившиеся за годы или десятилетия, могут привести к неконтролируемым лесным пожарам, будь то возгорание от молнии или людей. В отличие от полного исключения пожаров, в настоящее время обычной практикой в некоторых регионах является признание местных практик, поддерживающих управляемые запасы топлива и продуктивные экосистемы посредством периодических контролируемых сжиганий[50,57,59,107,110]. Тем не менее, некоторые страны по-прежнему следуют политике тушения лесных пожаров, при которой попытки полностью исключить огонь из ландшафта могут увеличивать интенсивность и серьезность лесных пожаров в засушливый сезон[55].

Решения сообществ в Латинской Америке

Дивинополис, Минас-Жерайс, Бразилия. **Источник:** Кристиам де Лима / Shutterstock.com

В Латинской Америке отсутствие надлежащей политики управления пожарами насчитывает несколько столетий[55,101,102]. Тем не менее, все более частые экстремальные лесные пожары требуют особого внимания со стороны сельских, традиционных и коренных сообществ, которые не только непосредственно страдают от беспорядков при таких пожарах, но в некоторых случаях ограничены также в управлении своими территориями[10]. Поэтому они внедрили древние методы управления пожарами, обеспечивающие самые безопасные результаты, путем защиты себя, сохранения природных экосистем, необходимых средств к существованию, выращивания сельскохозяйственных культур и предотвращения распространения лесных пожаров[10,50,103].

В последнее десятилетие правительства некоторых стран Латинской Америки признали традиционные знания о пожарах и извлекли уроки из этих древних методов управления пожарами, чтобы скорректировать свои стратегии предотвращения лесных пожаров[55,103]. В 2014 году в Бразилии была запущена пилотная программа комплексного управления пожарами, вдохновленная бразильско-немецким проектом сотрудничества «Предотвращение, контроль и мониторинг лесных пожаров в Серрадо» и успешной австралийской методологией по борьбе с выбросами и поглощению углерода[104,105]. Программа началась в 3 охраняемых районах Серрадо и через 5 лет расширилась до 74 областей, распределенных по всем бразильским биомам.

Это комплексное управление пожарами сократило площадь, выжженную лесными пожарами к концу засушливого сезона, на 57 процентов и уменьшило выбросы парниковых газов на 36 процентов[50,106]. Кроме того, более 2 000 членов местных традиционных пожарных команд, в том числе из коренного населения, ежегодно нанимаются и проходят обучение для проведения профилактических мероприятий и мероприятий по тушению пожаров, а также для сбора данных по оценке воздействия различных пожаров на виды растений и животных[107,108]. Согласованные усилия по найму и обучению женщин из числа коренных народов от сообщества ксеренте включают в себя акцент на оборудование, методы мобилизации и контролируемого огня, безопасность, а также общее экологическое образование[108].

Охват программы по-прежнему ограничен некоторыми охраняемыми территориями, и большая часть территории Бразилии по-прежнему очень уязвима для катастрофических лесных пожаров, подобных тем, что произошли в 2019 и 2020 годах. Тем не менее, у сельских землевладельцев и правительства есть большой потенциал для расширения этих успешных методов управления по снижению повторных ежегодных потерь и рисков лесных пожаров.

Более продолжительные сезоны пожаров из-за потепления климата могут затруднить практику контролируемых сжиганий, поскольку для безопасного проведения таких сжиганий в целях уменьшения топлива требуются специфические условия. Повышение температуры и доступность топлива в результате более продолжительного вегетационного периода и более жаркой и сухой погоды могут изменить возможности безопасных контролируемых сжиганий, что повлечет последствия для долгосрочного управления риском лесных пожаров[91].

Долгосрочное планирование зависит от различных компонентов сотрудничества между странами и регионами мира, включая совместное использование таких ресурсов, как самолеты и пожарные в Северном и Южном полушариях. Это хорошо работало, когда сезоны пожаров не перекрывались. Теперь, в связи с более продолжительными сезонами пожаров и более интенсивным спросом на противопожарные ресурсы во время экстремальных лесных пожаров, такое совместное использование возможностей становится все более затруднительным[3,34].

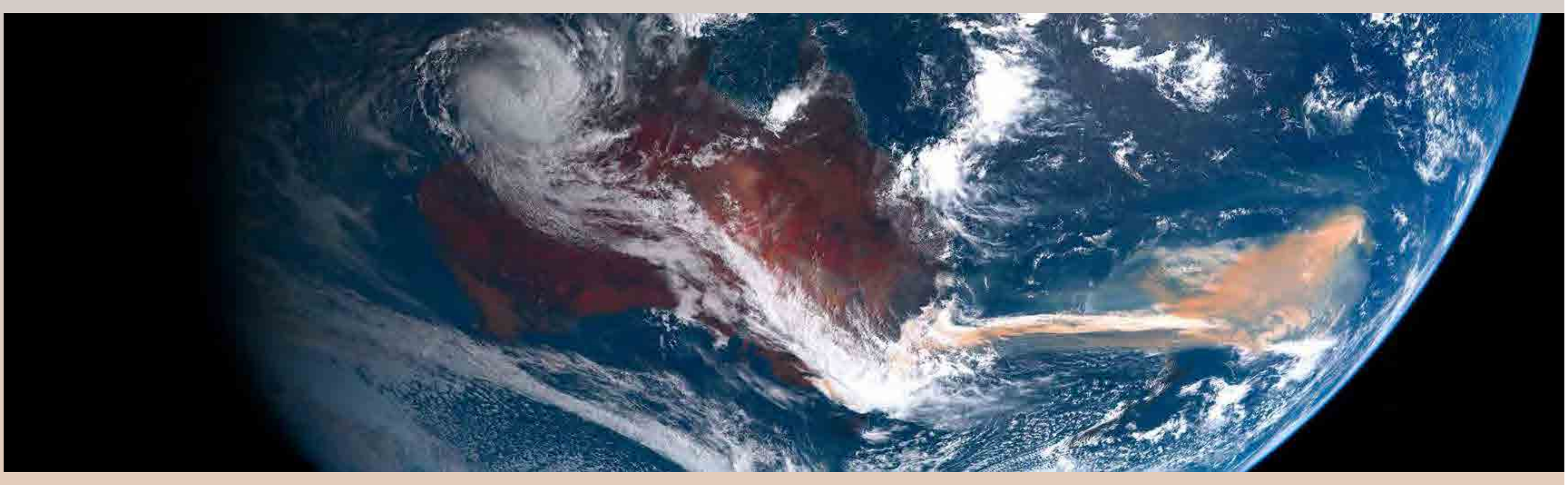
Королевская комиссия по расследованию пожаров в Австралии в 2019-2020 годах представила широкий набор рекомендаций, всесторонне охватывающих улучшение планирования, политики и практики, повышение противопожарных возможностей, повышение устойчивости сообществ, а также стратегии управления земельными ресурсами, включающие местную практику контролируемых сжиганий[3]. Рекомендации поддерживают улучшение стандартов проектирования зданий и инфраструктуры на границе нетронутых территорий и городов. Использование знаний о том, как факторы риска уже изменились и, вероятно, продолжат меняться, могло бы дать практические инструменты для включения науки об изменении климата в повседневную практику в целях повышения устойчивости.

Следующее десятилетие будет иметь решающее значение для повышения устойчивости и способности адаптироваться к лесным пожарам. На всех этапах обеспечения готовности и реагирования необходимо использовать совместные подходы и вовлекать уязвимые группы[109]. Последствия для детей, женщин, пожилых людей, людей с ограниченными возможностями и других групп риска могут повлиять на целые сообщества и все общество в целом как непосредственно во время экстремального явления, так и в течение многих лет после него. Помочь решить вопросы экологической целостности и социальной справедливости могут местные знания[110]. Дальнейшие исследования должны быть связаны с подверженностью уязвимых групп рискам до, во время и после экстремальных лесных пожаров.

Дополнительные и улучшенные исследования по снижению риска пожаров должны включать оценку затрат, интегрированную с социальными науками, и экологические оценки эффективности различных действий[110]. Расширенные научные знания экстремальных лесных пожаров должны дать ответ, как меняется землепользование, или как управление земельными ресурсами влияет на эти события. В дальнейших исследованиях следует изучить, как могут измениться в будущем условия освещения и растительности, учитывая значительную неопределенность из-за ограничений имеющихся в настоящее время методов моделирования климата, особенно посредством наблюдений и сбора данных об экстремальных явлениях, включая системы гроз, вызванных лесными пожарами[84].

Давление этих факторов будет становиться все более ощутимым по мере роста ущерба и вреда, наносимого изменениями климата. Для предотвращения катастрофических последствий от усугубления экстремальных лесных пожаров, возможности наших сообществ по подготовке к этим экстремальным пожарам, реагированию на них и управлению ими должны соответствовать ускорению влияния изменения климата или превышать уровень его угрозы.

Повышение устойчивости: новые инструменты и подходы к борьбе с лесными пожарами



Снимок, сделанный 6 января 2020 года, показывает атмосферный перенос аэрозолей на большие расстояния от беспрецедентных лесных пожаров вдоль юго-восточного побережья Австралии в широкую южную часть Тихого океана. Осаждение в океане аэрозолей лесных пожаров стимулировало крупномасштабное цветение фитопланктона. **Источник:** Японское метеорологическое агентство и НАСА

Увеличение частоты и интенсивности стихийных бедствий создает большую проблему для существующих подходов к снижению риска бедствий. Новые инструменты предлагают расширенные возможности для устранения риска системных бедствий. В глобальном масштабе совершенствованию систем мониторинга, прогнозирования и управления лесными пожарами способствует совершенствование данных моделирования и наблюдений, в том числе с помощью средств дистанционного зондирования — спутников, наземных радаров, обнаружения молний и обработки данных.

Мощность мониторинга и обработки данных, предлагаемая такими системами, как программа Европейского союза Коперник по наблюдению за Землей и Национальным управлением США по аэронавтике и исследованию космического пространства, позволяет поддерживать усилия во всем мире[112]. Латиноамериканская региональная сеть дистанционного зондирования и лесных пожаров обеспечивает совместные усилия и решения для операций по борьбе с пожарами в Латинской Америке[113]. Национальный институт космических исследований Бразилии содействует исследованиям и расширяет возможности мониторинга по региону, благодаря программе Кеймадас, разрабатывающей инновационные инструменты для обнаружения рисков лесных пожаров, и регулярно обновляемой информации об источниках тепла[114].

Южная Африка использует вложенную модель предотвращения пожаров и управления ими в рамках программы Work on Fire, согласно которой провинциальные ассоциации противопожарной защиты координируют свои действия с окружными и местными партнерами для развития навыков и занятости населения, ориентированных на управление пожарами и тушение пожаров[115].

Теперь в Австралии есть возможность долгосрочного прогнозирования пожароопасных условий погоды с предоставлением пожарным службам рекомендаций, помогающим принимать решения в широком интервале времени. Кроме того, предоставляются прогнозы изменения климата для групп по управлению чрезвычайными ситуациями, в том числе пожарным службам и специалистам по планированию. Это помогает принимать основанные на фактических данных решения о климатических опасностях, связанных с управлением окружающей средой, энергетикой, инфраструктурой, здравоохранением и финансами[116].

В *Австралийской национальной рамочной программе по снижению риска бедствий*, утвержденной в национальной политике в марте 2020 года, изменение климата определяется как основной фактор повышения устойчивости к бедствиям и принимается системный подход к управлению комплексными мерами по уменьшению опасности бедствий и реагированию на них[117]. В этом подходе признается важность развития устойчивых сообществ через социальные и экономические сети, которые сотрудничают и разделяют ответственность при реагировании на стихийные бедствия и адаптации к изменению климата[118,119]. В последние годы в подходе страны к управлению стихийными бедствиями особое внимание уделялось укреплению устойчивости и потенциала до наступления самого стихийного бедствия[117]. Создание сети и повышение национального потенциала знаний и навыков посредством партнерских отношений, образовательных и профессиональных программ в разных секторах имеет основополагающее значение не только для борьбы с лесными пожарами, но и для устойчивости к стихийным бедствиям в более широком смысле[120].

Список литературы

1. Higuera, P.E. and Abatzoglou, J.T. (2021). Record-setting climate enabled the extraordinary 2020 fire season in the western United States. *Global Change Biology* 27(1), 1-2. https://doi.org/10.1111/gcb.15388
2. Ruffault, J., Curt, T., Moron, V., Trigo, R.M., Mouillot, F., Koutsias, N. *et al.* (2020). Increased likelihood of heat-induced large wildfires in the Mediterranean Basin. *Scientific Reports* 10(1), 1-9. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70069-z
3. Australia, Commonwealth of Australia (2020). Royal Commission into National Natural Disaster Arrangements. Australian Government. https://naturaldisaster.royalcommission.gov.au
4. Dowdy, A.J., Ye, H., Pepler, A., Thatcher, M., Osbrough, S.L., Evans, J.P. *et al.* (2019). Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific Reports* 9(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x
5. Abram, N.J., Henley, B.J., Gupta, A.S., Lippmann, T.J., Clarke, H., Dowdy, A.J. *et al.* (2021). Connections of climate change and variability to large and extreme forest fires in southeast Australia. *Communications Earth & Environment* 2(1), 1-17. https://doi.org/10.1038/s43247-020-00065-8
6. Canadell, J.G., Meyer, C.P., Cook, G.D., Dowdy, A., Briggs, P.R., Knauer, J. *et al.* (2021). Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change. *Nature Communications* 12, 6921. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27225-4
7. Van Oldenborgh, G.J., Krikken, F., Lewis, S., Leach, N.J., Lehner, F., Saunders, K.R. *et al.* (2021). Attribution of the Australian bushfire risk to anthropogenic climate change. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(3), 941-960. https://doi.org/10.5194/nhess-21-941-2021
8. Ward, M., Tulloch, A.I., Radford, J.Q., Williams, B.A., Reside, A.E., Macdonald, S.L. *et al.* (2020). Impact of 2019–2020 mega-fires on Australian fauna habitat. *Nature Ecology & Evolution* 4(10), 1321-1326. https://doi.org/10.1038/s41559-020-1251-1
9. Holz, A., Paritsis, J., Mundo, I.A., Veblen, T.T., Kitzberger, T., Williamson, G.J. *et al*. (2017). Southern Annular Mode drives multicentury wildfire activity in southern South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(36), 9552–9557. https://doi.org/10.1073/pnas.1705168114
10. Eloy, L., Hecht, S., Steward, A., Mistry, J. (2019). Firing up: Policy, politics and polemics under new and old burning regimes. *The Geographical Journal* 185(1), 2–9. https://doi.org/10.1111/geoj.12293
11. Schmidt, I.B. and Eloy, L. (2020). Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. *Flora* 268, 151613. https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151613
12. INPE (2020). Portal de dados abertos e sistema de monitoramento do Programa Queimadas. *Instuto Nacional de Pesquisas Espacias*. https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/dados-abertos/
13. Vargas-Cuentas, N.I. and Roman-Gonzalez, A. (2021). Satellite-Based Analysis of Forest Fires in the Bolivian Chiquitania and Amazon Region: Case 2019. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 36(2), 38-54. https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3033392
14. Garcia, L.C., Szabo, J.K., de Oliveira Roque, F., Pereira, A.D.M.M., da Cunha, C.N., Damasceno-Júnior, G.A. *et al.* (2021). Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. *Journal of Environmental Management* 293, 112870. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112870
15. Andela, N., Morton, D.C., Giglio, L., Paugam, R., Chen, Y., Hantson, S. *et al.* (2019). The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed and direction. *Earth System Science Data*, 11, 529–552. https://doi.org/10.5194/essd-11-529-2019
16. Navarro, K.M., Kleinman, M.T., Mackay, C.E., Reinhardt, T.E., Balmes, J.R., Broyles, G.A. *et al.* (2019). Wildland firefighter smoke exposure and risk of lung cancer and cardiovascular disease mortality. *Environmental Research* 173, 462-468. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.060
17. Marlier, M.E., Bonilla, E.X. and Mickley, L.J. (2020). How do Brazilian fires affect air pollution and public health?. *GeoHealth* 4(12), e2020GH000331. https://doi.org/10.1029/2020GH000331
18. Aguilera, R., Corringham, T., Gershunov, A., and Benmarhnia, T. (2021). Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nature Communications*, 12(1), 1-8. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0

19. Chen, G., Guo, Y., Yue, X., Tong, S., Gasparrini, A., Bell, M.L. *et al*. (2021). Mortality risk attributable to wildfire-related PM2.5 pollution: a global time series study in 749 locations. *The Lancet Planetary Health*, 5(9), E579-E587. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00200-X

20. Silveira, S., Kornbluh, M., Withers, M.C., Grennan, G., Ramanathan, V. and Mishra, J. (2021). Chronic Mental Health Sequelae of Climate Change Extremes: A Case Study of the Deadliest Californian Wildfire. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(4), 1487. https://doi.org/10.3390/ijerph18041487

21. Ikeda, K. and Tanimoto, H. (2015). Exceedances of air quality standard level of PM2.5 in Japan caused by Siberian wildfires. *Environmental Research Letters* 10(10), 105001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/10/105001

22. Ford, B., Val Martin, M., Zelasky, S.E., Fischer, E.V., Anenberg, S.C., Heald, C.L. *et al.* (2018). Future fire impacts on smoke concentrations, visibility, and health in the contiguous United States. *GeoHealth* 2(8), 229-247. https://doi.org/10.1029/2018GH000144

23. Bencherif, H., Bègue, N., Kirsch Pinheiro, D., du Preez, D.J., Cadet, J-M, da Silva Lopes, F.J. *et al.* (2019). Investigating the Long-Range Transport of Aerosol Plumes Following the Amazon Fires (August 2019): A Multi-Instrumental Approach from Ground-Based and Satellite Observations. *Remote Sensing* 12(22), 3846. https://doi.org/10.3390/rs12223846

24. Machado-Silva, F., Libonati, R., Melo de Lima, T.F., Peixoto, R.B., de Almeida França, J.R., de Avelar Figueiredo Mafra Magalhães, M. *et al.* (2020). Drought and fires influence the respiratory diseases hospitalizations in the Amazon. *Ecological Indicators* 109, 105817. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105817

25. Masri, S., Scaduto, E., Jin, Y. and Wu, J. (2021). Disproportionate Impacts of Wildfires among Elderly and Low-Income Communities in California from 2000–2020. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(8), 3921. https://doi.org/10.3390/ijerph18083921

26. Abatzoglou, J.T. and Williams, A.P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(42), 11770-11775. https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113

27. Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I. *et al*. (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In *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*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al*. (eds.). In Press. https://www.ipcc.ch/sr15/

28. The Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/

29. Kirchmeier-Young, M.C., Gillett, N.P., Zwiers, F.W., Cannon, A.J. and Anslow, F.S. (2019). Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season. *Earth's Future* 7(1), 2–10. https://doi.org/10.1029/2018EF001050

30. Williams, A.P., Abatzoglou, J.T., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Bishop, D.A., Balch, J.K. *et al.* (2019). Observed impacts of anthropogenic climate change on wildfire in California. *Earth's Future* 7(8), 892-910. https://doi.org/10.1029/2019EF001210

31. Australia, Bureau of Meteorology (2020). Special Climate Statement #73. Bureau of Meteorology, Victoria, Australia. http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/

32. Barbero, R., Abatzoglou, J.T., Pimont, F., Ruffault, J. and Curt, T. (2020). Attributing increases in fire weather to anthropogenic climate change over France. *Frontiers in Earth Science* 8, 104. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00104

33. Lewis, S.C., Blake, S.A., Trewin, B., Black, M.T., Dowdy, A.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E. *et al.* (2020). Deconstructing factors contributing to the 2018 fire weather in Queensland, Australia. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101(1), S115-S122. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0144.1

34. Abatzoglou, J.T., Juang, C.S., Williams, A.P., Kolden, C.A. and Westerling, A.L. (2021). Increasing synchronous fire danger in forests of the western United States. *Geophysical Research Letters* 48(2), e2020GL091377. https://doi.org/10.1029/2020GL091377

35. Bowman, D.M.J.S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W.J., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M. *et al*. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography* 38(12), 2223-2236. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x

36. Bond, W.J. and Keane, R.E. (2017). Fires, Ecological Effects of. *Elsevier*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.02098-7

37. Cochrane, M.A. and Bowman, D.M.J.S. (2021). Manage fire regimes, not fires. *Nature Geoscience* 14(7), 455-457. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00791-4

38. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal (2021). Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. UNEP: Nairobi, GRID-Arendal, Arendal. https://www.grida.no

39. Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D.P., Humber, M.L. and Justice, C.O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. Remote Sensing of Environment, 217, 72-85. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005

Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D.P., Humber, M.L. and Justice, C.O. (2018). Monthly MODIS Burned Area Product (MCD64A1 v006). Accessed on 07/10/2021 from Global Forest Watch (https://globalforestwatch.org/)

40. Krebs, P., Pezzatti, G.B., Mazzoleni, S., Talbot, L.M. and Conedera, M. (2010). Fire regime: history and definition of a key concept in disturbance ecology. *Theory in Biosciences*, 129(1), 53–69. https://doi.org/10.1007/s12064-010-0082-z

41. Myers, R.L. (2006). Living with Fire – Sustaining Ecosystems & Livelihoods through Integrated Fire Management. *The Nature Conservancy*. https://www.cbd.int/doc/pa/tools/Living%20with%20Fire.pdf

42. Bowman, D.M., Kolden, C.A., Abatzoglou, J.T., Johnston, F.H., van der Werf, G.R. and Flannigan, M. (2020). Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(10), 500-515. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3

43. Fidelis, A. (2020). Is fire always the "bad guy"?. *Flora* 268, 151611. https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151611

44. Fusco, E.J., Finn, J.T., Balch, J.K., Chelsea Nagy, R. and Bradley, B.A. (2019). Invasive grasses increase fire occurrence and frequency across US ecoregions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(47) 23594-23599. https://doi.org/10.1073/pnas.1908253116

45. Pivello, V.R., Vieira, I., Christianini, A.V., Ribeiro, D.B., da Silva Menezes, L., Berlinck, C.N. *et al.* (2021). Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Perspectives in Ecology and Conservation* 19(3), 233-255. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005.

46. Armenteras, D., Dávalos, L.M., Barreto, J.S., Miranda, A., Hernández-Moreno, A., Zamorano-Elgueta, C. *et al.* (2021). Fire-induced loss of the world's most biodiverse forests in Latin America. *Science Advances* 7(33), eabd3357. https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3357

47. Bento-Gonçalves, A. and Vieira, A. (2020). Wildfires in the wildland-urban interface: Key concepts and evaluation methodologies. *Science of the Total Environment* 707, 135592. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135592

48. Baylis, P. and Boomhower, J. (2019). *Moral hazard, wildfires, and the economic incidence of natural disasters.* National Bureau of Economic Research, Working paper 26550. https://doi.org/10.3386/w26550

49. Laris, P. and Wardell, D.A. (2006). Good, bad or 'necessary evil'? Reinterpreting the colonial burning experiments in the savanna landscapes of West Africa. *Geographical Journal* 172(4), 271-290. https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2006.00215.x

50. Mistry, J., Bilbao, B.A. and Berardi, A. (2016). Community owned solutions for fire management in tropical ecosystems: case studies from Indigenous communities of South America. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371(1696), 20150174. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2015.0174

51. Thompson, M.P., MacGregor, D.G., Dunn, C.J., Calkin, D.E. and Phipps, J. (2018). Rethinking the Wildland Fire Management System. *Journal of Forestry* 116(4), 382–390. https://doi.org/10.1093/jofore/fvy020

52. Brotons, L., Aquilué, N., de Cáceres, M., Fortin, M-J. and Fall, A. (2013) How Fire History, Fire Suppression Practices and Climate Change Affect Wildfire Regimes in Mediterranean Landscapes. *PLoS ONE* 8(5), e62392. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062392

53. Durigan, G. and Ratter, J.A. (2016). The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *Journal of Applied Ecology* 53(1), 11-15. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12559

54. Batista, E.K.L., Russell-Smith, J., França, H. and Figueira, J.E.C. (2018). An evaluation of contemporary savanna fire regimes in the Canastra National Park, Brazil: Outcomes of fire suppression policies. *Journal of Environmental Management* 205, 40-49. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.053

55. Moura, L.C., Scariot, A.O., Schmidt, I.B., Beatty, R. and Russell-Smith, J. (2019). The legacy of colonial fire management policies on traditional livelihoods and ecological sustainability in savannas: Impacts, consequences, new directions. *Journal of Environmental Management* 232, 600-606. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.057

56. Cochrane, M.A. (2019). Burning questions about ecosystems. *Nature Geoscience* 12, 86–87. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0306-x

57. Russell-Smith, J., Cook, G.D., Cooke, P.M., Edwards, A.C., Lendrum, M., Meyer, C.P. and Whitehead P.J. (2013). Managing fire regimes in north Australian savannas: applying Aboriginal approaches to contemporary global problems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11(s1), e55-e63. https://doi.org/10.1890/120251

58. Russell-Smith, J., McCaw, L. and Leavesley, A. (2020). Adaptive prescribed burning in Australia for the early 21st Century–context, status, challenges. *International Journal of Wildland Fire* 29(5), 305-313. https://doi.org/10.1071/WF20027

59. Russell-Smith, J., Moura, L.C., Yates, C., Beatty, R., Mafoko, J. and Johnston, S. (2021). Market-based options for supporting sustainable fire management of fire-prone Cerrado (savanna) remnant landscapes. *Biodiversidade Brasileira - BioBrasil* (2), 153–167. https://doi.org/10.37002/biobrasil.v11i2.1725

60. Kharuk, V.I., Ponomarev, E.I., Ivanova, G.A., Dvinskaya, M.L., Coogan, S.C. and Flannigan, M.D. (2021). Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio* 50(11), 1953-1974. https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x

61. Hanes, C.C., Wang, X., Jain, P., Parisien, M.A., Little, J.M. and Flannigan, M.D. (2019). Fire-regime changes in Canada over the last half century. *Canadian Journal of Forest Research* 49(3), 256-269. https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0293

62. Kitzberger, T., Perry, G.L.W., Paritsis, J., Gowda, J.H., Tepley, A.J., Holz, A. *et al.* (2016). Fire-vegetation feedbacks and alternative states: common mechanisms of temperate forest vulnerability to fire in southern South America and New Zealand. *New Zealand Journal of Botany* 54(2), 247-272. https://doi.org/10.1080/0028825X.2016.1151903

63. Brando, P., Macedo, M., Silvério, D., Rattis, L., Paolucci, L., Alencar, A. *et al*. (2020). Amazon wildfires: Scenes from a foreseeable disaster. *Flora* 268, 151609. https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151609

64. Marengo, J.A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Deusdará Leal, K.R., Broedel, E., Seluchi, M.E. *et al.* (2021). Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water* 3, 13. https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204

65. Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias-Muñoz, C. *et al.* (2021). The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin. Publications Office of the European Union, Luxembourg. https://doi.org/10.2760/773

66. Dowdy, A.J. (2018). Climatological Variability of Fire Weather in Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57(2), 221-234. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0167.1

67. Australia, Bureau of Meteorology and CSIRO (2020). State of the Climate 2020. http://www.bom.gov.au/state-of-the-climate/

68. Strydom, S. and Savage, M.J. (2017). Potential impacts of climate change on wildfire dynamics in the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Climatic Change* 143(3), 385-397. https://doi.org/10.1007/s10584-017-2019-8

69. González, M.E., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R. and Díaz-Hormazábal, I. (2018). The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere* 9(8), e02300. https://doi.org/10.1002/ecs2.2300

70. Kouassi, J-L.K., Wandan, N.E. and Mbow, C. (2018). Assessing the Impact of Climate Variability on Wildfires in the N'Zi River Watershed in Central Côte d'Ivoire. *Fire* 1(3),36. https://doi.org/10.3390/fire1030036

71. Kraaij, T., Baard, J.A., Arndt, J., Vhengani, L. and Van Wilgen, B.W. (2018). An assessment of climate, weather, and fuel factors influencing a large, destructive wildfire in the Knysna region, South Africa. *Fire Ecology* 14(2), 1-12. https://doi.org/10.1186/s42408-018-0001-0

72. Dupuy, J., Fargeon, H., Martin, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M. *et al*. (2019). Climate Change Impact on Future Wildfire Danger and Activityin Southern Europe: A Review. *Annals of Forest Science* 77(2), 1-24. https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5

73. Ertugrul, M., Varol, T., Ozel, H.B., Cetin, M. and Sevik, H. (2021). Influence of climatic factor of changes in forest fire danger and fire season length in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(1), 1-17. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08800-6

74. Dowdy, A.J. and Mills, G.A. (2012). Characteristics of lightning-attributed wildland fires in south-east Australia. *International Journal of Wildland Fire* 21(5), 521-524. https://doi.org/10.1071/WF10145

75. Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M. and Lampin, C. (2012). A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management* 51(3), 651-662. https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z

76. Romps, D.M., Seeley, J.T., Vollaro, D. and Molinari, J. (2014). Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346(6211), 851-854. https://doi.org/10.1126/science.1259100

77. Collins, K.M., Price, O.F. and Penman, T.D. (2015). Spatial patterns of wildfire ignitions in south-eastern Australia. *International Journal of Wildland Fire* 24(8), 1098-1108. https://doi.org/10.1071/WF15054

78. Abatzoglou, J.T., Kolden, C.A., Balch, J.K., and Bradley, B.A. (2016). Controls on interannual variability in lightning-caused fire activity in the western US. *Environmental Research Letters* 11(4), 045005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/045005r

79. Balch, J.K., Bradley, B.A., Abatzoglou, J.T., Nagy, R.C., Fusco, E.J. and Mahood, A.L. (2017). Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(11), 2946-2951. https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114

80. Mariani, M., Holz, A., Veblen, T.T., Williamson, G., Fletcher, M.-S., and Bowman, D.M.J.S. (2018). Climate change amplifications of climate-fire teleconnections in the Southern Hemisphere. *Geophysical Research Letters* 45(10), 5071–5081. https://doi.org/10.1029/2018GL078294

81. Nagy, R., Fusco, E., Bradley, B., Abatzoglou, J.T. and Balch, J. (2018). Human-related ignitions increase the number of large wildfires across US ecoregions. *Fire* 1(1), 4. https://doi.org/10.3390/fire1010004

82. Veraverbeke, S., Rogers, B., Goulden, M., Jandt, R.R., Miller, C.E., Wiggins, E.B. *et al*. (2017). Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. *Nature Climate Change* 7(7), 529–534. https://doi.org/10.1038/nclimate3329

83. Dowdy, A. J. (2020). Climatology of thunderstorms, convective rainfall and dry lightning environments in Australia. *Climate Dynamics* 54(5), 3041-3052. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05167-9

84. Fromm, M., Lindsey, D.T., Servranckx, R., Yue, G., Trickl, T., Sica, R. *et al*. (2010). The untold story of pyrocumulonimbus. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91(9),1193-1210. https://doi.org/10.1175/2010BAMS3004.1

85. Dowdy, A.J., Fromm, M.D and McCarthy, N. (2017). Pyrocumulonimbus lightning and fire ignition on Black Saturday in southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(14), 7342-7354. https://doi.org/10.1002/2017JD026577

86. Dowdy, A.J. and Pepler, A. (2018). Pyroconvection risk in Australia: Climatological changes in atmospheric stability and surface fire weather conditions. *Geophysical Research Letters* 45(4), 2005-2013. https://doi.org/10.1002/2017GL076654

87. Kablick III, G., Fromm, M., Miller, S., Partain, P., Peterson, D., Lee, S. *et al.* (2018). The Great Slave Lake pyroCb of 5 August 2014: Observations, simulations, comparisons with regular convection, and impact on UTLS water vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(21), 12-332. https://doi.org/10.1029/2018JD028965

88. Peterson, D.A., Campbell, J.R., Hyer, E.J., Fromm, M.D., Kablick, G.P., Cossuth, J.H. *et al*. (2018). Wildfire-driven thunderstorms cause a volcano-like stratospheric injection of smoke. *NPJ Climate and Atmospheric Science* 1(1), 1-8. https://doi.org/10.1038/s41612-018-0039-3

89. Zuev, V.V., Gerasimov, V.V., Nevzorov, A.V. and Savelieva, E.S. (2019). Lidar observations of pyrocumulonimbus smoke plumes in the UTLS over Tomsk (Western Siberia, Russia) from 2000 to 2017. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(5), 3341-3356. https://doi.org/10.5194/acp-19-3341-2019

90. Di Virgilio, G., Evans, J.P., Blake, S.A., Armstrong, M., Dowdy, A.J., Sharples, J. *et al.* (2019). Climate change increases the potential for extreme wildfires. *Geophysical Research Letters* 46(14), 8517-8526. https://doi.org/10.1029/2019GL083699

91. Clarke, H., Pitman, A.J., Kala, J., Carouge, C., Haverd, V. and Evans, J. (2016). An investigation of future fuel load and fire weather in Australia. *Climatic Change* 139(3), 591-605. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1808-9

92. Haverd, V., Smith, B., Canadell, J.G., Cuntz, M., Mikaloff-Fletcher, S., Farquhar, G. *et al*. (2020). Higher than expected CO2 fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26(4), 2390-2402. https://doi.org/10.1111/gcb.14950

93. Mondal, P. and McDermid, S.S. (2021). Editorial for Special Issue: "Global Vegetation and Land Surface Dynamics in a Changing Climate". *Land* 10(1), 45. https://doi.org/10.3390/land10010045

94. Moreira, F., Ascoli, D., Safford, H., Adams, M.A., Moreno, J.M., Pereira, J.M.C. *et al.* (2020). Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed. *Environmental Research Letters* 15(1), 011001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab541e

95. Ingalsbee, T. (2017). Whither the paradigm shift? Large wildland fires and the wildfire paradox offer opportunities for a new paradigm of ecological fire management. *International Journal of Wildland Fire*, 26(7), 557-561. https://doi.org/10.1071/WF17062

96. Hugelius, G., Loisel, J., Chadburn, S., Jackson, R.B., Jones, M., MacDonald, G. *et al*. (2020). Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. *Proceedings of the National Academy of Science*s 117(34), 20438-20446. https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117

97. Yanagiya, K. and Furuya, M. (2020). Post-Wildfire Surface Deformation Near Batagay, Eastern Siberia, Detected by L-Band and C-Band InSAR. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 125(7), e2019JF005473. https://doi.org/10.1029/2019JF005473

98. Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S. and Schellnhuber, H.J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(6), 1786-1793. https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105

99. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. *et al*. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(33), 8252-8259. https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115

100. Gatti, L.V., Basso, L.S., Miller, J.B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H.L. *et al*. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595(7867), 388-393. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6

101. Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Hernández, P. A., Ortiz-Contla, H., Chavarría-Sánchez, M. R. and Hernandez-Santiago, F. (2011). The present status of fire ecology, traditional use of fire, and fire management in Mexico and Central America*. Fire Ecology* 7(1), 40-56. https://doi.org/10.4996/fireecology.0701040

102. Sletto, B. (2008). The knowledge that counts: institutional identities, policy science, and the conflict over fire management in the Gran Sabana, Venezuela. *World Development* 36(10), 1938-1955. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2008.02.008

103. Bilbao, B., Mistry, J., Millán, A. and Berardi, A. (2019). Sharing Multiple Perspectives on Burning: Towards a Participatory and Intercultural Fire Management Policy in Venezuela, Brazil, and Guyana. *Fire* 2(3), 39. https://doi.org/10.3390/fire2030039

104. Australia, Commonwealth of Australia (2018). Carbon Credits (Carbon Farming Initiative – Savanna Fire Management – Emissions Avoidance) Methodology Determination. https://www.industry.gov.au/regulations-and-standards/methods-for-the-emissions-reduction-fund/savanna-fire-management-emissions-avoidance-method

105. Schmidt, I.B., Moura, L.C., Ferreira, M.C., Eloy, L., Sampaio, A.B., Dias, P.A. *et al*. (2018). Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. *Journal of Applied Ecology* 55(5), 2094-2101. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13118

106. Berlinck, C.N. and Batista, E.K. (2020). Good fire, bad fire: It depends on who burns. *Flora* 268, 151610. https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151610

107. de Moraes Falleiro, R., Steil, L., de Oliveira, M.S., Lando, I., Machado, L.D.O.R., Cunha, A.M.C. *et al*. (2021). Histórico, Avaliação, Oportunidades e Desafios do Manejo Integrado do Fogo nas Terras Indígenas Brasileiras. *Biodiversidade Brasileira - BioBrasil* (2), 75-98. https://revistaeletronica.icmbio.gov.br/BioBR/article/view/1742

108. Government of Brazil (2021). Ibama contrata mais de 1,5 mil brigadistas, o equivalente a 89,8% do previsto no edital. 22 September 2021. https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2021/09/ibama-contrata-mais-de-1-5-mil-brigadistas-o-equivalente-a-89-8-do-previsto-no-edital. Accessed 12 January 2022

109. Bello, O., Bustamante, A. and Pizarro, P. (2021). Planning for disaster risk reduction within the flamework of the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Project Documents* (LC/TS.2020/108), Santiago, Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46639/1/S2000452_en.pdf

110. Douglas K. Bardsley, Thomas A.A. Prowse & Caren Siegfriedt (2019). Seeking knowledge of traditional Indigenous burning practices to inform regional bushfire management. *Local Environment* 24:8, 727-745, https://doi.org/10.1080/13549839.2019.1640667

111. Paveglio, T.B. (2021). From Checkers to Chess: Using Social Science Lessons to Advance Wildfire Adaptation Processes. *Journal of Forestry*, 119(6), 618-639. https://doi.org/10.1093/jofore/fvab028

112. United States of America, National Aeronautics and Space Administration. (2022). Fire Information for Resource Management System. https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/. Accessed 4 February 2022.

113. RedLaTIF (2021). Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales. http://www.redlatif.org/en/. Accessed 10 December 2021.

114. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2021). Situação Atual, 9 December. https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/situacao-atual. Accessed 9 December 2021.

115. South Africa, Department of Forestry, Fisheries, and the Environment (2021). Working on Fire. https://www.dffe.gov.za/projectsprogrammes/workingonfire

116. AFAC (2018). Fire and Emergency Services and Climate Change. Position Version 1.0, 24 October 2018. https://www.afac.com.au/docs/default-source/doctrine/afac-position-fire-and-emergency-services-and-climate-change.pdf

117. Australia, Department of Home Affairs (2018). *National Disaster Risk Reduction Framework*. https://www.homeaffairs.gov.au/emergency/files/national-disaster-risk-reduction-framework.pdf

118. Westcott, R., Ronan, K., Bambrick, H. and Taylor, M. (2020). Natural hazards and adaptive response choices in a changing climate: Promoting bushfire preparedness and risk reduction decision-making. *Social Sciences & Humanities Open* 2(1), 100065. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2020.100065

119. Wunder, S., Calkin, D.E., Charlton, V., Feder, S., de Arano, I.M., Moore, P. *et al*. (2021). Resilient landscapes to prevent catastrophic forest fires: Socioeconomic insights towards a new paradigm. *Forest Policy and Economics* 128, 102458. http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102458

120. Australian Institute for Disaster Resilience (2021). AIDR Service Statement 2021-2025 - Our approach. https://www.aidr.org.au/media/8807/aidr-approach-2021-25_2021-07-13_v11_digital.pdf

Графические ссылки

Области, охваченные пожарами за последние два десятилетия

Ангола

Catarino, S., Romeiras, M.M., Figueira, R., Aubard, V., Silva, J.M.N. and Pereira, J.M.C. (2020). Spatial and Temporal Trends of Burnt Area in Angola: Implications for Natural Vegetation and Protected Area Management. *Diversity*, 12, 307. https://doi.org/10.3390/d12080307

Австралия

Canadell, J.G., Meyer, C.P., Cook, G.D., Dowdy, A., Briggs, P.R., Knauer, J. *et al.* (2021). Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change. *Nature Communications* 12, 6921. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27225-4

Боливия

Heyer, J.P., Power, M.J., Field, R.D. and van Marle, M.J. (2018). The impacts of recent drought and fire in lowland Bolivia on forest loss and regional smoke emissions. *Biogeosciences*. https://doi.org/10.5194/bg-2017-462

Бразилия

Le Stradic, S. and Buisson, E. (2021). Restoring savannas and tropical herbaceous ecosystems, Encyclopedia of the Environment: The Cerrado biome. https://www.encyclopedie-environnement.org/en/zoom/cerrado-biome/

Schmidt, I.B. and Eloy, L. (2020). Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. *Flora* 268, 151613. https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151613

Канада

Veraverbeke, S., Rogers, B., Goulden, M., Jandt, R.R., Miller, C.E., Wiggins, E.B. *et al*. (2017) Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. *Nature Climate Change* 7, 529–534. https://doi.org/10.1038/nclimate3329

Чили

McWethy, D.B., Pauchard, A., Garcı´a, R.A., Holz, A., Gonza´lez, M.E., Veblen, T.T. *et al*. (2018) Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PLoS ONE* 13(8):e0201195. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201195

Мексика

Zúñiga-Vásquez, J.M., Cisneros-González, D. and Pompa-García, M. (2017). Drought regulates the burned forest areas in Mexico: the case of 2011, a record year. *Geocarto International* 34, 1–14. https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1415986

Парагвай

Chen, Y., Morton, D.C., Jin, Y., Collatz, G.J., Kasibhatla, P.S., van der Werf, G.R. *et al*. (2013). Long-term trends and interannual variability of forest, savanna and agricultural fires in South America. *Carbon Management*, 4(6), 617-638. https://doi.org/10.4155/cmt.13.61

Россия 2003

Forkel, M., Thonicke, K., Beer, C., Cramer, W., Bartalev, S. and Schmullius, C. (2012). Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044021. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044021

Ponomarev E.I., Kharuk, V.I. and Ranson, K.J. (2016). Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests. *Forests*, 7(6), 125. https://doi.org/10.3390/f7060125

Лесные пожары в эпоху антропоцена

Что такое лесной пожар?

38. UNEP and GRID-Arendal (2021).

Лесной пожар и экосистемы

36. Bond and Keane (2017).

Keane R.E. (2019). Fire Ecology. In: Manzello S. (eds) Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_254-1

Виды лесных пожаров

Keeley, J. E. (2012). Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forest Science* 69, 445–453. https://doi.org/10.1007/s13595-012-0201-8

Pyne, S. (2010). The Ecology of Fire. *Nature Education Knowledge* 3(10):30. https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-ecology-of-fire-13259892/

Xanthopoulos G. and Athanasiou, M. (2020). Crown Fire. In: Manzello S.L. (eds) Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_13

Зависимые от огня растения

36. Bond and Keane (2017)

Keeley, J. E. (2012). Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forest Science* 69, 445–453. https://doi.org/10.1007/s13595-012-0201-8

Keeley, J.E. and Fotheringham, C.J. (2000). Role of fire in regeneration from seed. In Fenner, M. (ed.), Seeds: the ecology of regeneration in plant communities. Chapter 13. CAB International. http://dx.doi.org/10.1079/9780851994321.0000

Где горит огонь

15. Andela *et al*. (2019)

Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D.P., Humber, M.L. and Justice, C.O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*, 217, 72-85. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005

Режимы пожаров меняются

Изменение режимов пожаров в отдельных биомах и изменение землепользования

35. Bowman *et al*. (2011)

36. Bond and Keane (2017)

42. Bowman *et al*. (2020)

Shlisky, A. (2007). Fire, ecosystems and people: Threats and strategies for global biodiversity conservation. Wildfire conference 2007, Seville, Spain. https://www.researchgate.net/publication/259657820

MapBiomas Project (2020). Collection 6 of the Annual Series of Land Use and Land Cover Maps of Brazil, 16 August. https://mapbiomas.org/infograficos-1?cama_set_language=en. Accessed 1 December 2021.

Souza, C.M. Jr., Shimbo, Z.J., Rosa, M.R., Parente, L.L., Alencar, A.A., Rudorff, B.F.T. *et al*. (2020). Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing* 12(17), 2735. https://doi.org/10.3390/rs12172735

NASA Earth Observatory (2022). What's behind California's surge of large fires? https://earthobservatory.nasa.gov/images/148908/whats-behind-californias-surge-of-large-fires

Огонь и инвазивные виды

44. Fusco *et al.* (2019)

Halofsky, J.E., Peterson, D.L. and Harvey, B.J. (2020). Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Fire Ecology*, 16, 4 https://doi.org/10.1186/s42408-019-0062-8

Hamilton, N.P., Yelenik, S.G., Durboraw, T.D., Cox, R.D. and Gill, N.S. (2021). Understanding Grass Invasion, Fire Severity, and *Acacia koa* Regeneration for Forest Restoration in Hawai'i Volcanoes National Park. *Land* 10, 962. https://doi.org/10.3390/land10090962

Pausas, J.G. and Keeley, J.E. (2014). Abrupt Climate-Independent Fire Regime Changes. *Ecosystems* 17, 1109–1120. https://doi.org/10.1007/s10021-014-9773-5

Изменение климата: пожароопасная погода становится все более экстремальной

36. Bond and Keane (2017)

42. Bowman *et al*. (2020)

Keeley, J.E. and Syphard, A.D. (2016). Climate Change and Future Fire Regimes: Examples from California. *Geosciences*, 6(3):37. https://doi.org/10.3390/geosciences6030037

Rogers, B.M., Balch, J.K., Goetz, S.J., Lehmann, C.E.R. and Turetsky, M. (2020). Focus on changing fire regimes: interactions with climate, ecosystems, and society. *Environmental Research Letters*, 15(3), p.030201. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d3a

Возгорание от молнии

36. Bond and Keane (2017)

42. Bowman *et al*. (2020)

Kharuk, V.I., Ponomarev, E.I., Ivanova, G.A. Dvinskaya, M.L., Coogan, S.C.P. and Flannigan, M.D. (2021). Wildfires in the Siberian taiga. Ambio. https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x

Veraverbeke, S., Rogers, B., Goulden, M., Jandt, R.R., Miller, C.E., Wiggins, E.B. *et al*. (2017). Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. *Nature Climate Change* 7, 529–534. https://doi.org/10.1038/nclimate3329

Грозы, рожденные пожаром

Australia, National Environmental Science Programme (2020). Fire-generated thunderstorms and climate change in Australia. https://nespclimate.com.au/wp-content/uploads/2021/05/ESCC_Fire-Generated-Thunderstorms_Brochure.pdf

Воздействие экстремальных лесных пожаров на систему Земли

Загрязнение атмосферы

Lapere, R., Mailler, S. and Menut, L. (2021). The 2017 Mega-Fires in Central Chile: Impacts on Regional Atmospheric Composition and Meteorology Assessed from Satellite Data and Chemistry-Transport Modeling. *Atmosphere* 12, 344. https://doi.org/10.3390/atmos12030344

Изменение альбедо

42. Bowman *et al*. (2020)

de Magalhães, N., Evangelista, H., Condom, T., Rabatel, A. and Ginot, P. (2019). Amazonian biomass burning enhances tropical Andean glaciers melting. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-019-53284-1

Поглотитель углерода превращается в источник углерода

42. Bowman *et al*. (2020)

Загрязнение воды

Bladon, K.D., Emelko, M.B., Silins, U. and Stone, M. (2014). Wildfire and the future of water supply. *International Journal of Environmental Science and Technology* 48(16), 8936–8943. https://doi.org/10.1021/es500130g

Hauer, F.R. and Spencer, C.N. (1998). Phosphorus and nitrogen dynamics in streams associated with wildfire: a study of immediate and longterm effects. *International Journal of Wildland Fire* 8(4), 183-198. https://doi.org/10.1071/WF9980183

Yu, M., Bishop, T.F. and Van Ogtrop, F.F. (2019). Assessment of the decadal impact of wildfire on water quality in forested catchments. *Water* 11(3) 533. https://doi.org/10.3390/w11030533

Эрозия

Bladon, K.D., Emelko, M.B., Silins, U. and Stone, M. (2014). Wildfire and the future of water supply. *International Journal of Environmental Science and Technology* 48(16), 8936–8943. https:/doi.org/10.1021/es500130g

Увеличение уровня удобрения в океане

Tang, W., Llort, J., Weis, J., Perron, M.M.G., Basart, S., Li, Z. *et al*. (2021). Widespread phytoplankton blooms triggered by 2019–2020 Australian wildfires. *Nature*, 597(7876), 370–375. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03805-8

Утрата биоразнообразия

Halofsky, J.E., Peterson, D.L. and Harvey, B.J. (2020). Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Fire Ecology* 16(4), 1-26. https://doi.org/10.1186/s42408-019-0062-8

Виды, находящиеся под угрозой из-за изменения режимов пожаров

Kelly, L.T., Giljohann, K.M., Duane, A., Aquilué, N., Archibald, S., Batllori, E. *et al*. (2020). Fire and biodiversity in the Anthropocene. *Science*, 370(6519). https://doi.org/10.1126/science.abb0355

Фенология

Изменение климата меняет ритм природы

Автор

Марсель Э. Виссер, Нидерландский институт экологии (NIOO-KNAW), Вагенинген, Нидерланды.

Рецензенты

Гэри Табор, Центр сохранения больших ландшафтов, Монтана, США.
Гита Рамасвами, Фонд охраны природы, Индия.
Келли Ортега-Сиснерос, Кейптаунский университет, Южная Африка.
Леонор Патрисия Сердейра Мореллато, Институт биологических наук, Государственный университет Сан-Паулу, Бразилия.
Ребекка Аш, кафедра биологии, Университет Восточной Каролины, США.
Сёко Сакаи, Центр экологических исследований, Киотский университет, Япония.
Эльза Клеланд, Калифорнийский университет, Сан-Диего, США.
Ян ван Гилс, Королевский институт морских исследований Нидерландов, т-Хорнтье, Нидерланды.
Ян Витасс, Швейцарский федеральный исследовательский институт, Швейцария.

1. Временные рамки — главный фактор для гармонии экосистемы

Временные рамки имеют решающее значение в мире природы. Птенцы птиц должны вылупляться тогда, когда есть пища для их питания, опылители должны быть активны тогда, когда цветут их растения-хозяева, а белоснежные зайцы должны менять цвет своей шкурки с белого на коричневый тогда, когда снег исчезает. Фенология исследует сроки повторяющихся стадий жизненного цикла, обусловленных факторами окружающей среды, и то, каким образом взаимодействующие виды реагируют на временные изменения в экосистеме[1,2]. Растения и животные часто используют температуру, продолжительность светового дня, приход дождей или другие физические изменения в качестве сигналов для начала следующего этапа их сезонного цикла. Если весна наступает раньше, то многие птицы начинают раньше размножаться, поскольку по мере повышения температуры это соответствует более раннему появлению пищи для их птенцов. Из-за того, что на эти сигналы такое сильное влияние оказывает температура, одними из наиболее заметных последствий глобального изменения климата за последние десятилетия, по крайней мере, в умеренных и полярных регионах мира, стали фенологические сдвиги.

Температура является не единственной переменной среды, влияющей на фенологию. В более высоких широтах другой важной переменной является световой период или длина светового дня, которая меняется в разное время года[3-5]. Хотя световой период не зависит от изменения климата, от него самого может зависеть степень влияния температуры на фенологию: в некоторых системах высокие температуры будут указывать на начало следующей стадии во время длительного светового периода, но не во время короткого[3,6,7]. В более высоких широтах некоторым растениям и насекомым, чтобы хорошо реагировать на более высокие температуры после их наступления, требуется предварительный период низкой температуры, называемый зимним охлаждением[8-10]. Некоторые виды зависят от огня, указывающего на следующий этап жизненного цикла, например стимулированное огнем высвобождение семян из шишек и их прорастание[11,12]. Примером с водой является влияние дождя на речные стоки, что, в свою очередь, влияет на время и продолжительность миграции рыб, наряду с температурой воды и световым периодом[13-15].

В тропических регионах из-за меньшего колебания температуры и дневного света фенологические взаимосвязи сложнее, чем в регионах с четкими годовыми сезонными циклами[16-18]. Тропические виды демонстрируют различные фенологические стратегии, этапы развития отдельных особей в популяции могут быть не синхронизированы, а циклы могут быть короче 12 месяцев. В тропических регионах вызывать следующую стадию жизненного цикла могут различные факторы, включая дождь, засуху, наличие влаги и обильное воздействие солнечного света[17-21].

Главная проблема фенологических изменений, вызванных изменением климата, заключается в том, что не все взаимозависимые виды в конкретной экосистеме меняются в одном направлении или с одинаковой скоростью[16,22-26]. Причина различий заключается в том, что каждый организм по-своему зависит от разных экологических факторов или к одному фактору окружающей среды проявляет разные уровни чувствительности[5,17,27,28]. Внутри пищевых цепочек растения могут изменять свое развитие быстрее, чем животные, которые ими питаются, что вызывает фенологические несоответствия. Значительные фенологические несоответствия выявлены у широкого круга видов растений и животных в ходе подробных исследований различных стадий жизненного цикла[16,22,30-34]. Эти несоответствия между хищником и источником пищи в пищевых цепочках влияют на темпы роста, размножения и выживания отдельных особей с возможными последствиями для целых популяций и экосистем.

Источник изображения: книга Meyers Lexicon 1908 года и Nicku / Shutterstock.com.

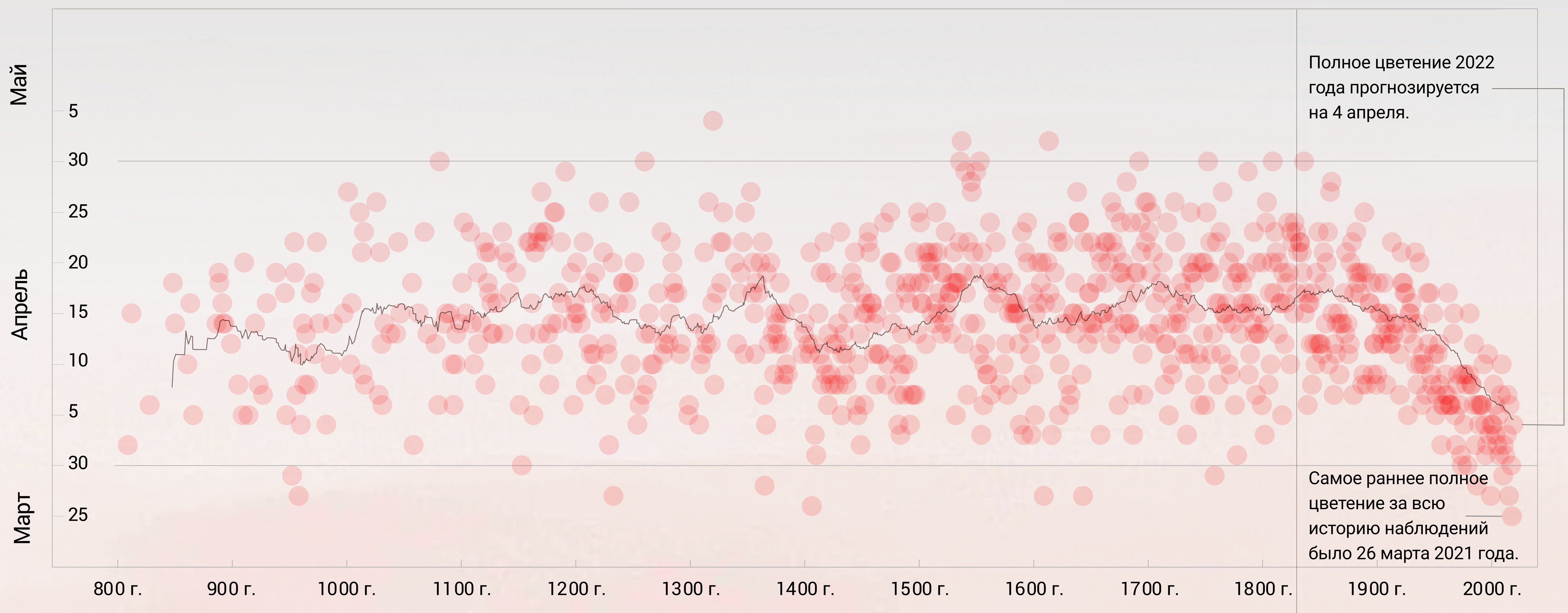
Фенология в тропиках

Ключевой особенностью тропического климата является отсутствие отчетливых сезонных колебаний температуры[18]. Напротив, более четкие фазы в годовых тропических циклах определяются изменением количества осадков и сменой между сухим и влажным сезонами[16,18]. Частота и интенсивность осадков или их отсутствие являются решающим фактором фенологических изменений для тропических растений, наряду с солнечным светом, влажностью и незначительными изменениями температуры[16-21]. С учетом большого разнообразия видов в тропических экосистемах фенологические реакции внутри видов и сообществ на эти факторы носят разнообразный и сложный характер[19,35].

Характер осадков в тропических регионах сильно зависит от Южной осцилляции Эль-Ниньо/Ла-Нинья (ENSO), характеризующейся чередованием теплых и холодных фаз температуры поверхности моря в экваториальной части Тихого океана[36]. Эти аномалии происходят каждые 2-7 лет и обычно длятся 9-12 месяцев[36]. Сообщества тропических растений реагируют на феномен ENSO массовым цветением, вызванным Эль-Ниньо, или плодоношением, вызванным засухой[17,18,20,37]. Более частые и более интенсивные экстремальные погодные явления, вызванные ENSO и изменением климата, вероятно, будут еще больше нарушать сроки образования листьев, цветения и формирования плодов[17,18]. Такие фенологические изменения будут оказывать каскадное воздействие на зависимые от них травоядные, нектароядные и плодоядные виды, а также на другие функциональные группы в экосистемах[17,19]. Долгосрочных наблюдений за фенологическими изменениями в тропиках все еще недостаточно, и прогнозирование величины фенологических сдвигов и несоответствий остается проблемой[18].

Цветению сакуры более 1200 лет

Линия тренда — скользящая средняя за 50 лет.



Источник данных: исторические данные предоставлены д-ром Ясуюки Аоно, Университет префектуры Осака, Япония, доступно по адресу http://atmenv.envi.osakafu-u.ac.jp/aono/kyophenotemp4/.

Данные за 1950 год предоставлены Японским метеорологическим агентством, доступны по адресу http://www.data.jma.go.jp/sakura/data/index.html.

В Японии цветение сакуры (*Prunus jamasakura*) знаменует приход весны и занимает центральное место в японской культуре. Празднование цветения сакуры восходит к 712 г. н.э.[38]. Исторически фенологические наблюдения в Киото регистрировали в древних дневниках и хрониках[39-41]. Исследователи собрали ряд фенологических данных по датам полного цветения сакуры из этих документов, начиная с 812 года н.э.[39-41].

На протяжении 1200 лет начало полного цветения варьировало от конца марта до начала мая[42].

С 30 годов 19 века годов период цветения постепенно сдвигался к более ранним датам, что совпало также с повышением температуры, основанным на метеорологических наблюдениях, уже скорректированных по влиянию городской жары[41,42].

2. Нарушение гармонии экосистемы

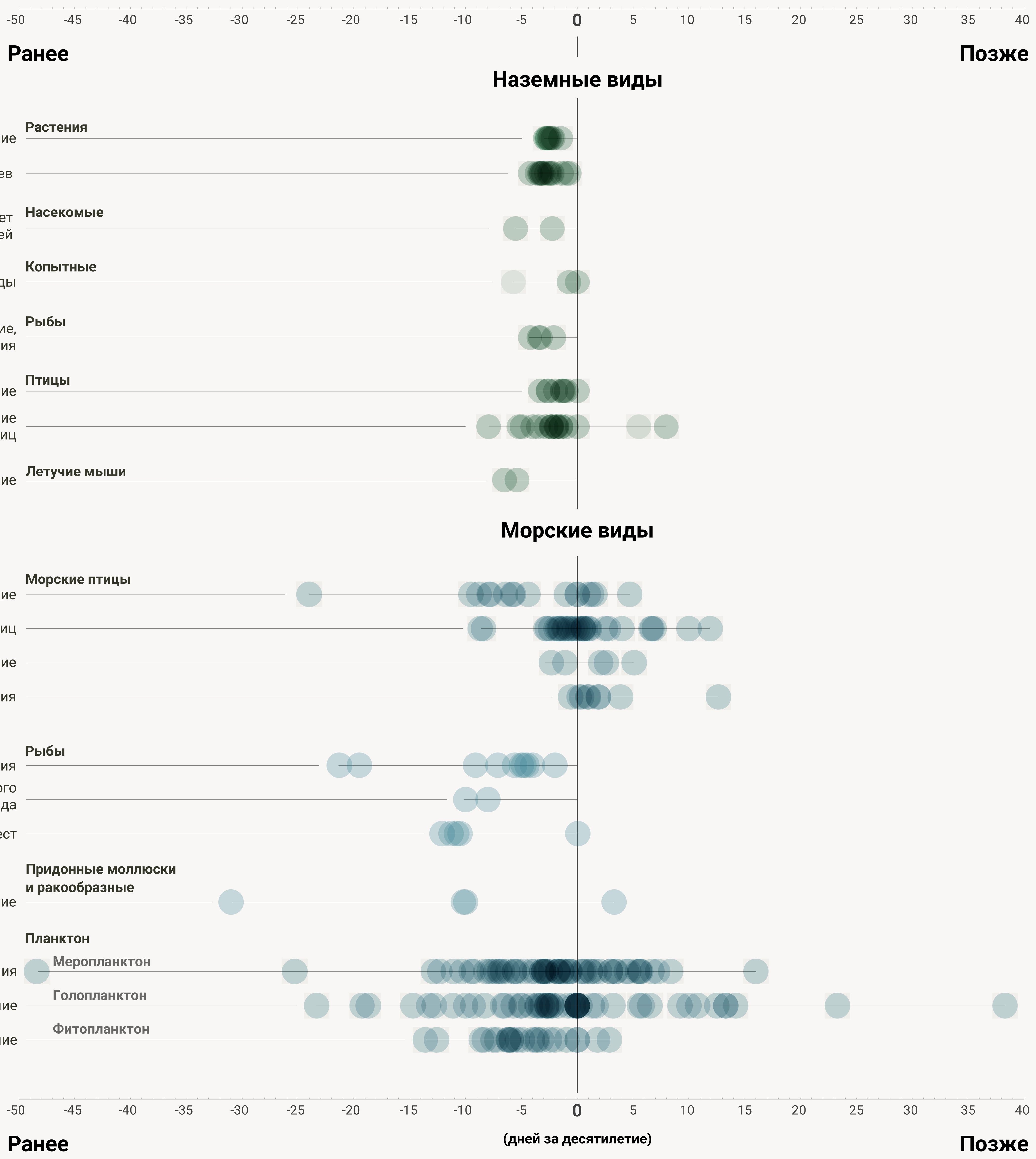
Фенологические сдвиги, связанные с изменением климата, обнаружены на различных стадиях: размножение, цветение, распускание листьев, начало развития личинок, линька, зимовка, миграция и др. Подтверждающие данные были получены в исследованиях, сравнивающих фенологические сдвиги между большими наборами видов – растений, насекомых, рыб, земноводных, птиц и млекопитающих, для которых посредством наблюдений в обоих полушариях в течение длительного времени регистрировались фенологические события[16,23,29-33,43-51]. Исследователи отследили также увеличивающуюся вероятность фенологических несоответствий в различных регионах, в том числе с помощью 10 000 наборов данных о растениях и животных в Соединенном Королевстве, наземных видов в Альпах, более 1 200 временных рядов фенологических тенденций в южном полушарии, в том числе морских видов в разных океанах[16,19,23,32,43,51].

Выявление сдвигов, отслеживание тенденций

В начале 2000-х годов исследователи опубликовали несколько новаторских широкомасштабных оценок фенологических сдвигов, которые стали образцами для текущей работы[22,29,30]. Обобщенный анализ этих баз данных показывает, что жизненные стадии 203 видов растений и животных сдвигались на более ранние сроки примерно на 2,8 дня каждое десятилетие[30]. С тех пор на предмет фенологических тенденций были оценены дополнительные экосистемы и биомы. На показанной ниже диаграмме представлены фенологические сдвиги, наблюдаемые в таксономических группах, согласно недавним оценкам[31-33,49].

Каждый кружок представляет количественно выраженную скорость фенологической реакции конкретного вида, так как он означает сдвиг стадии жизненного цикла к более ранней или более поздней дате на соответствующее количество дней за десятилетие. Круги перекрываются, если два или более вида в одной и той же таксономической группе изменяются с одинаковой скоростью.

Полный список литературы см. на стр. 57.



Исследование птиц представляет достаточно доказательств того, что возникающие несоответствия оказывают влияние на успех размножения. Вылупление птенцов таких видов, как мухоловки-пеструшки (*Ficedula hypoleuca*) и большие синицы (*Parus major*), должно происходить в во время, когда их обычная кормовая база в виде гусениц самая обильная[52-55]. Период максимального снабжения продовольствием недолог, всего несколько недель, поэтому выбор правильного времени имеет решающее значение. Другим птицам, как, например, тонкоклювая кайра (*Uria aalge*), необходимо точно синхронизировать время своего размножения с прибрежной миграцией их основной добычи, мелкой кормовой рыбы[56].

Разные этапы жизни в рамках годового цикла должны быть синхронизированы. Для мигрирующих видов годовые циклы включают этапы перемещения в места размножения, собственно размножения, линьки и возвращения в места зимовки. Некоторые стадии жизненного цикла, как, например, размножение, очень чувствительны к температуре. С повышением температуры меняется репродуктивная фенология, в то время как другие стадии, как, например, линька, более чувствительны к световым периодам, поэтому они не происходят синхронно[57,58].

Фенологические реакции различаются в зависимости от морских экосистем и сезонных циклов, что приводит к несоответствиям между видами и группами в пищевых цепочках[31,32,43,59]. Исследования показывают, что в морской среде фенологические реакции на изменение климата проявляются быстрее, чем на суше[31,32]. Различные морские группы, от планктона до хищников высших звеньев пищевых цепочек, изменяют свою фенологию с разной скоростью, это означает, что изменение климата может вызывать несоответствия и во всех океанических сообществах[31,32,60,61].

Различия темпов фенологических реакций на потепление в наземных, пресноводных и морских экосистемах в итоге могут повлиять на виды, которые зависят от различных экосистем в плане фенологического перехода к следующей стадии жизненного цикла. Примеры включают рыб, мигрирующих между морскими и пресноводными экосистемами, множество насекомых, земноводных и птиц, стадии жизненного цикла которых зависят как от наземных, так и от водных экосистем[24,62-64]. Несоответствующие фенологические сдвиги могут вызывать широкомасштабные нарушения пищевых цепочек и экологические последствия[26].

Несмотря на то, что фенологические реакции на изменение климата хорошо задокументированы, большего внимания заслуживают остающиеся вопросы о связях с численностью популяций и с последствиями для экосистем[34,51]. В Арктике после таяния снега из-за более высоких температур значительно ускорился вегетационный период, от которого зависят матери и телята северного оленя карибу (*Rangifer tarandus*). Теперь детеныши карибу рождаются слишком поздно, что приводит к уменьшению приплода на 75 процентов[65]. У косуль (*Capreolus capreolus*) увеличение разрыва между датой рождения и доступностью пищи также снижает шансы телят на выживание[66].

Асинхронные изменения в фенологии широкого круга взаимодействующих видов могут потенциально нарушить функционирование целых экосистем и формирование экосистемных услуг, от которых зависят человеческие системы[34,61]. Серьезные последствия для всех аспектов рыболовства имеют сдвиги в фенологии коммерчески важных морских видов и их вылов[47,67-69]. Фенологическая реакция сельскохозяйственных культур на сезонные колебания будет создавать проблемы для производства продовольствия в условиях изменения климата. Например, к большим экономическим потерям для садов приводят фруктовые деревья, которые рано цветут, а затем подвергаются поздним заморозкам[70]. Фенологические сдвиги уже усложняют адаптацию к изменению климата для основных сельскохозяйственных культур по всему миру[71].

Голодные птицы и ранние гусеницы

Давний и хорошо известный пример фенологического несоответствия – большая синица (*Parus major*) и гусеницы бабочек в качестве ее пищи[54,55]. Эта маленькая певчая птица, гнездящаяся в норах, встречается в Азии и Европе и высиживает необычно большие выводки. В течение 18 дней, необходимых для полного развития быстрорастущих птенцов, родители должны обеспечить их большим количеством пищи. Во время этого периода взрослые бабочки могут откладывать почти по одной гусенице в минуту[72]. Чтобы обеспечить необходимый уровень снабжения пищей, птицы используют температуру в качестве сигнала для определения времени своего размножения, чтобы птенцы появлялись в гнездах при максимальной численности гусениц на дубах. По тем же причинам вылупление гусениц из яиц приурочено к появлению молодой листвы на дубах[73].

Полевые наблюдения показывают различные фенологические реакции этих двух взаимодействующих видов на разных участках[54,55,74,75]. В ответ на тенденцию к потеплению в популяции большой синицы в Нидерландах ускорилась кладка яиц, но этого сдвига недостаточно, чтобы соответствовать пику популяции гусениц[54,55,74]. Прогнозы показывают, что в ближайшие десятилетия фенология гусениц будет продолжать меняться быстрее, чем у птиц, еще больше увеличивая это несоответствие[76]. Напротив, популяционное исследование в Соединенном Королевстве в течение 47 лет показало, что временные сдвиги и птиц, и гусениц меняются примерно с одинаковой скоростью, сохраняя синхронность взаимодействия[75]. Аналогичные результаты были получены в Бельгии и Чешской Республике[77,78]. Эти результаты показывают сложность фенологических реакций между видами и популяциями в различных средах[27,80].

Невероятные путешествия:

проблема несвоевременной миграции

Миграция является поведенческой адаптацией к сезонным условиям[81]. Периодические перемещения животных между местами обитания позволяют им в разное время года в разных местах оптимизировать использование ресурсов. Миграция необходима и тогда, когда сезонные температуры воздуха или воды становятся неблагоприятными для размножения или выращивания потомства. Поэтому большинство мигрирующих видов происходит из высокоширотных регионов, где изменения сезонов и доступных ресурсов наиболее заметны[81]. Мигрируют различные виды насекомых, ракообразных, рептилий, рыб и млекопитающих, многие из которых преодолевают значительные расстояния. Некоторые перелетные птицы гнездятся в высоких широтах Арктики и спасаются от зимы в более низких широтах, китообразные мигрируют между экватором и полярными пастбищами, а мигрирующие травоядные млекопитающие на разных континентах следуют за сезонными изменениями растительности[81,82].

Виды, мигрирующие на большие расстояния, особенно уязвимы к фенологическим изменениям, вызванным неравномерными последствиями потепления климата по регионам. Местные климатические сигналы, которые обычно запускают миграцию, уже не могут точно предсказать условия как в пункте назначения, так и в местах остановок на маршруте. Еще более усложняется проблема для мигрантов, возвращающихся в полярные регионы, где скорость и масштабы климатических изменений самые большие[83,84]. Следовательно, многие мигрирующие виды борются за прибытие в такое время, когда качественная пища все еще в изобилии, погода подходит для определенных стадий жизненного цикла, давление хищников или конкуренции ниже, а паразитов и патогенов меньше[34,81,85,86]. Ускорение весенней фенологии в высоких широтах привело к увеличению степени экологического несоответствия мигрирующих видов, с потенциальными последствиями для численности популяции[81,86,87].

Многие виды демонстрируют способность изменять свое миграционное поведение, от корректировки времени до изменения маршрутов и мест остановок[81,85,88,89]. Но их способность к адаптации в ответ на изменение климата уже подорвана другими текущими угрозами. Мигрирующим видам угрожают экологическая деградация, фрагментация и утрата мест кормления, размножения, отдыха и охоты, загрязнение окружающей среды, а также другие опасности во время дальних путешествий, и им приходится все сильнее приспосабливаться к быстрым изменениям окружающей среды[88,90].

В свете изменения климата условия, направленные на максимальное увеличение адаптивного потенциала и повышение устойчивости популяций, требуют снижения обычных угроз и изменения существующих политик и стратегий сохранения видов[81,91]. Максимизировать адаптационный потенциал мигрирующих видов могли бы обширная сеть различных критически важных объектов и охраняемые местообитания[88]. Также очень важно обеспечить и улучшить связь наземных и морских местообитания, имеющих решающее значение для расселения и сейчас, и в будущем[88,92]. Улучшение связей среды обитания поможет поддерживать необходимые для выживания видов адаптивную генетическую изменчивость и жизнеспособность популяции.

Европейские перелетные птицы

Анализ времени весеннего прилета 117 видов европейских перелетных птиц за 5 десятилетий свидетельствует об увеличении фенологического несоответствия весенним событиям. Это способствовало сокращению популяции некоторых мигрирующих видов, особенно зимующих в странах Африки к югу от Сахары[87].

Белый аист *(Ciconia ciconia)*

Белый аист является долгоживущей мигрирующей птицей, зимующей по всей территории Африки[93]. Аисты меняют время миграции, чтобы заблаговременно прибыть в места размножения в разных частях Европы, поэтому для предотвращения несоответствия с кормовой базой рано откладывают яйца.

Раннее размножение подвергает птенцов воздействию таких неблагоприятных условий, как сильный ветер и проливные дожди. Поскольку ожидается, что экстремальные погодные явления участятся в связи с изменением климата, смертность птенцов белого аиста в будущем может увеличиться[94,95].

Бабочка данаида монарх *(Danaus plexippus)*

Североамериканская бабочка данаида монарх известна своими путешествиями протяженностью 4 300 км между местами летнего размножения на юге Канады и севере США и местами зимовки в центральной Мексике[96].

Обычно улетать на юг их побуждают укороченный световой день и более низкие температуры осенью. Проведенный в течение 29 лет анализ показывает, что начало их миграции задерживается на шесть дней каждое десятилетие из-за более высоких, чем обычно, температур. Поздние сезонные мигранты с меньшей вероятностью достигают мест зимовки, чем те, кто мигрирует в начале сезона, возможно, из-за несоответствия с наличием пищи по пути[97].

Белощекие казарки *(Branta leucopsis)*

Стаи белощеких казарок обычно мигрируют из мест зимовки на побережье Северного моря в места весеннего размножения на севере России и на Шпицбергене. Приспосабливаясь к изменению климата, они начинают мигрировать раньше, а чтобы избежать несоответствий с пищей в пункте назначения и для ускорения путешествия они, как правило, пропускают места кормежки вдоль Балтийского моря[98]. Несмотря на раннее прибытие, они не могут начать откладывать яйца, пока не накопят достаточно запасов для производства яиц. Таким образом, их птенцы вылупляются позже и часто не выживают.

Морские черепахи

Ряд мигрирующих морских черепах отреагировали на повышение температуры морской воды изменением времени гнездования. Обнаружено, что головастые морские черепахи (*Caretta caretta*) формируют гнезда раньше, а кожистые морские черепахи (*Dermochelys coriacea*) откладывают гнездование[99-102].

Однако для отслеживания оптимальных условий окружающей среды наблюдаемые сдвиги в фенологии гнездования, вероятно, недостаточны[101-103]. Температура пляжа во время инкубации влияет на успех вылупления и напрямую определяет пол вылупившегося детеныша – при более высоких температурах рождаются самки. В условиях быстро меняющегося климата успех вылупления и несбалансированное соотношение полов будет иметь последствия для популяций морских черепах.

Усатые киты

Большинство усатых китов сезонно мигрируют между местами отела в низких широтах и местами нагула в более высоких широтах, где они охотятся на плотные скопления криля или кормовой рыбы[85,104,105].

Известно, что многие виды усатых китов меняют время миграции в зависимости от наличия добычи. За последние 27 лет финвалы и горбатые киты ежегодно ускоряли свое прибытие в места нагула в заливе Св. Лаврентия у восточной части Канады на один день. Вероятно, это связано с более ранним вскрытием льда и повышением температуры поверхности моря, что вызывает более раннее цветение планктона и влияет на количество кормов[85]. Виды, мигрирующие на более короткие расстояния, как, например, финвалы, могут сокращать миграцию из-за изменений температуры и снижения зимнего морского льда, но мигрирующим на дальние расстояния, таким как, например, горбатые киты, сложнее правильно рассчитать время прибытия к наличию обильных кормов[85].

Важным местом размножения и отела горбатых китов в восточной части южной части Тихого океана является Колумбийский национальный природный парк Горгона. За последние три десятилетия их прибытие стало происходить на один месяц раньше. Вероятно, это связано с изменениями формирования морского льда в антарктических районах нагула, влияющими на доступность криля, а снижение кормов является сигналом к возвращению в тропические воды[105].

Известно также, что голубые киты северо-восточной части Тихого океана меняют миграцию, прибывая к местам нагула у берегов Калифорнии примерно на 42 дня раньше, чем 10 лет назад. Этот сдвиг был связан с повышением как минимум на 2°C температуры поверхности моря и, как следствие, с изобилием криля[106].

Хотя фенотипическая пластичность – способность адаптироваться к меняющимся сигналам окружающей среды – позволяет этим видам регулировать сроки миграции, изменение сроков одной стадии в течение годового жизненного цикла может негативно повлиять на другую. Длительное пребывание на кормовых территориях может сократить время размножения, и наоборот[106]. Необходима также адаптация к деятельности человека, включая рыболовство, морские перевозки и поисковые сейсмические испытания, которая позволит приспособиться к изменениям пребывания китов на охраняемых территориях и за их пределами[105].

3. Эволюция к новой синхронности

Для объяснения наблюдаемых несоответствий с изменениями климата необходимы долгосрочные фенологические исследования взаимодействующих видов в экосистеме. Долгосрочные исследования необходимы, но главная проблема заключается в доказательстве причинно-следственной связи. Изменение климата может влиять на температуру и количество осадков, но на реакцию видов могут одновременно влиять и другие факторы, такие как изменения в землепользовании, чрезмерная эксплуатация ресурсов, появление инвазивных видов и другие факторы экологического стресса. Неопределенность в отношении причинно-следственной связи можно частично устранить, минимизировав переменные: наблюдая за реакцией в разных местах, сравнивая популяции в районах с сильным потеплением и с небольшим потеплением, либо в разные периоды времени, сравнивая популяции в годы с быстрым повышением температуры с годами более медленного повышения[76,107]. Эти подходы позволяют лучше оценить конкретное влияние повышения температуры на фенологию видов, хотя они не решают вопросов, связанных с другими экологическими факторами, на которые также влияет температура. Например, во многих регионах характер осадков резко меняется в зависимости от климатических условий, изменяя сроки, частоту и интенсивность сезонов дождей[108,109]. По мере накопления данных исследователи понимают, что для запуска фенологического сигнала может потребоваться сочетание фенологических факторов, например, температуры, светового периода и осадков.

Сильный фенологический сдвиг в популяции в ответ на изменение окружающей среды указывает на то, что большая часть особей обладает способностью изменять временные рамки в одном и том же направлении. Эту способность называют фенологической пластичностью[110]. Эмпирические данные свидетельствуют о том, что эта пластичность является основным источником наблюдаемых фенологических сдвигов, связанных с климатом[111]. Но пластичность отдельных особей или популяций может не соответствовать быстрым изменениям окружающей среды, с которыми мы сталкиваемся[112]. Для успешной адаптации виды нуждаются также в генетических изменениях, что более вероятно у видов с коротким циклом размножения, таких как насекомые, чем у деревьев, которые растут в течение десятилетий[113]. Существует несколько примеров, главным образом среди насекомых и некоторых птиц, когда генетические изменения в ответ на изменение климата можно было бы признать микроэволюцией[114,115]. Но в целом генетические изменения происходят гораздо медленнее, чем меняется климат.

Фенологическая микроэволюция является процессом естественного отбора, при котором генетические изменения меняют фенологию видов для лучшего соответствия изменившемуся климату. Скорее всего, это явление сыграло важную роль в адаптации видов и экосистем к прошлым периодам потепления[113]. Тем не менее, поскольку скорость потепления сейчас намного выше, возможно, в 100 раз, то даже микроэволюция, вероятно, будет происходить слишком медленно для нынешних темпов изменения климата[116].

В целях создания благоприятных условий для микроэволюции на практике могут быть приняты меры по сохранению и управлению экосистемами[117]. Одной из таких мер является поддержка и развитие генетического разнообразия популяций, поскольку это является важнейшей предпосылкой для микроэволюции и естественного отбора. Увеличение экологической взаимосвязи с помощью коридоров между средами обитания позволит в пределах конкретной экосистемы заселять растениями и перемещать виды животных с новым генетическим материалом, способствуя генетическому разнообразию и увеличивая шансы на успешную адаптацию[118].

Вне досягаемости

Исландский песочник (*Calidris canutus*) – это кулик среднего размера из семейства бекасовых. Его мировая популяция сокращается и рассматривается как находящаяся под угрозой исчезновения. Шесть подвидов исландского песочника мигрируют на удивительно большие расстояния – от высокогорных районов размножения к местам зимовки на разных континентах[119].

Подвид (*Calidris canutus canutus*) гнездится в центральной и северной Сибири и мигрирует

в более теплые районы вдоль побережья Мавритании, особенно в национальный парк Банк-д'Арген. С таянием снега птицы спариваются и откладывают яйца. Готовясь к долгому путешествию в Африку, птенцы исландского песочника питаются насекомыми, сезонно появляющимися из оттаивающей вечной мерзлоты тундры[120].

За последние три десятилетия продолжительность таяния снега в высоких широтах Арктики последовательно увеличивалась на полдня каждый год, что привело к более раннему вылету и увеличению количества насекомых. Этот фенологический сдвиг у насекомых вызывает ряд последствий на более поздних стадиях жизни исландского песочника[120,121].

Из-за того, что птицы не смогли скорректировать свою фенологию размножения, их потомство пропускает пик изобилия своего корма. Недостаточные пищевые ресурсы означают недостаточный рост. Молодые исландские песочники становятся меньше, и летом при раннем таянии снега у них более короткие клювы[120].

После попадания птиц в Западную Африку их основным источником пищи становятся моллюски, зарытые в отложениях прилива. У таких короткоклювых птиц ухудшается доступ к многочисленным видам двустворчатых моллюсков (*Loripes lucinalis*), погребенным более глубоко в отложениях. Вместо этого они могут потреблять только неглубоко зарытые корневища морских водорослей (*Zostera noltii*) и редкие виды двустворчатых моллюсков (*Dosinia isocardia*).

Этот побочный эффект приводит к увеличению смертности короткоклювых исландских песочников. Данный пример показывает сложные последствия несоответствия, возникающего в одном месте и во время одной части жизненного цикла, на другую часть, протекающую на другом конце земного шара[120].

Примечание: масштаб не соблюдается.

4. Мосты к новым гармониям

Появление фенологических сдвигов можно определить только по многолетним записям. Сбор данных проводят научные учреждения, университеты, правительства и НПО. Такие инициативы, как Африканская фенологическая сеть, австралийский проект TERN, индийский проект SeasonWatch, британский календарь природы и Национальная фенологическая сеть США, включают в себя наблюдения граждан для отслеживания жизни растений, насекомых, птиц и млекопитающих. Эти обширные базы данных позволяют ученым выделять виды и места, подверженные наибольшему риску. Они также предоставляют данные для оценки МГЭИК допустимых для экосистем темпов потепления, что лежит в основе целей правительств по сокращению глобального потепления до пределов, установленных Парижским соглашением[122].

Фенологический мониторинг и гражданская наука

Фермеры, садоводы и любители природы по всему миру веками использовали свои знания о фенологических стадиях. Региональные и местные сети позволяют их участникам обмениваться знаниями и советами о различных средах и экосистемах. Благодаря современным средствам связи выявление и отслеживание развития растений и животных во многих странах стало обычным времяпрепровождением[123].

Официальные фенологические сады содержат подобранный набор растений для наблюдения за их реакцией на изменение местных условий. Ученые, работающие с национальными ботаническими садами и другими давно зарекомендовавшими себя организациями, создают в них зоны для выращивания одного и того же набора растений на разной широте, долготе и высоте для сбора данных и сравнения фенологических реакций с течением времени. Эти крупномасштабные системы наблюдения за поведением растений дают возможность другим исследователям использовать эти базы данных для определения базовых показателей и отслеживания тенденций в рамках их собственной работы[124].

Изучение собранных данных о фенологии и адаптивных изменениях ключевых видов позволяет получить надежные биологические доказательства изменения климата и адаптивной реакции коллекций живых организмов, которые поддерживают долгосрочный мониторинг биологии изменения климата[125].

Важным учебным пособием, посвященным критическим моментам в жизненном цикле видов, являются неофициальные фенологические сады, но для обеспечения качества данных они также должны соблюдать определенные правила. Всемирная программа обучения и наблюдений в интересах окружающей среды (GLOBE) предлагает рекомендации для тысяч участвующих в ней школ из 125 стран[126]. После трех десятилетий реализации программа GLOBE сейчас расширяет свои методы, правила и базы данных, чтобы включить также наблюдения гражданских ученых[127]. Вклад гражданской науки в фенологические знания простирается от определения дат цветения в их садах до проверки аэрофотоснимков и спутниковых изображений в целях наблюдения за мигрирующими стадами[128]. Продолжающийся гражданский научный проект «Рождественский подсчет птиц», инициированный Национальным обществом Одюбона США в 1900 году, охватывает большую часть Северной Америки и собрал надежные данные о сокращении популяции птиц за более чем сто лет[129].

Подборка гражданских научных проектов и мероприятий по фенологии

Глобальный охват

- Инициатива Earthdive
- Глобальная программа фенологического мониторинга
- Фенологические протоколы программы GLOBE
- Международная перепись водоплавающих птиц
- Сеть WorldBirds

Региональный охват

- Африканская фенологическая сеть
- База данных e-Butterfly
- Сеть охраны колибри
- Международные фенологические сады Европы
- Программа MonarchWatch
- Общеевропейский фенологический проект

Национальный охват

- Информационный центр в Silvestre Health
- Китайская сеть фенологических наблюдений
- Программа ClimateWatch, Австралия
- Фермерский календарь дикой природы, Ирландия
- Природа сегодня, Нидерланды
- Программа NatureWatch, Канада
- Сеть Phaenonet, Швейцария
- Проект PhenoRangers, Швейцария
- Программа SeasonWatch, Индия
- Британская сеть по изменениям окружающей среды
- Национальная фенологическая сеть США

Фенологические сдвиги и несоответствия, обусловленные изменением климата, на протяжении десятилетий влияют на услуги сельскохозяйственных экосистем[1,71,130-132]. Для решения проблем запаздывания вегетационных периодов, сокращения стадий вегетации из-за жары или засухи и других последствий климатических изменений, фермеры выбирают сорта, более устойчивые к изменению климата[133]. Внедрение новых методов, испытание новых семян, совместная эксплуатация банков семян и использование услуг по распространению знаний – все это компоненты климатически оптимизированного сельского хозяйства, продвигаемого Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций, многими НПО, а также национальными и субнациональными агентствами[134].

Количество исследований, в которых изучалось, каким образом фенологические сдвиги и несоответствия влияют на управление природными ресурсами и сохранение биоразнообразия, ограничено. При этом управляющие органы часто не понимают, как применять полученные данные на практике[135,136]. Фенологические данные можно использовать для информирования о мерах по борьбе с изменением климата, для оптимизации мониторинга и для обоснования оценки уязвимости к изменению климата[135]. Это особенно важно в таких менее изученных районах, как многие регионы Южного полушария[18,19]. Руководящим органам необходимо учитывать, как фенологические изменения влияют на их текущие стратегии. Например, руководство рыболовецкой отраслью обычно ежегодно обследуют популяции рыб, ориентируясь на даты, когда эти популяции были наиболее многочисленны в этом районе в прошлые годы. Фенологические сдвиги могут привести к тому, что такое обследование будет проводиться в неправильное время года, что приведет к искажению оценок популяции и допустимого объема вылова[60].

Недавние обзоры нескольких конкретных тематических исследований расширили охват примеров фенологии, фенологических сдвигов и фенологических несоответствий[27,32,33,49]. Эта более широкая перспектива, учитывающая большее количество видов, экосистем, регионов и различных действующих фенологических механизмов, может дать информацию о подходах, необходимых человеческим сообществам и экосистемам для помощи в адаптации к изменениям климата.

Более масштабные усилия по укреплению биологического разнообразия повысят устойчивость и адаптивность всех экосистем[137]. К немедленным необходимым мерам управления относится восстановление мест обитания, создание между ними коридоров для улучшения экологической связности и генетического разнообразия, корректировка границ охраняемых территорий по мере изменения ареалов видов, а также сохранение биоразнообразия в благоприятных для этого ландшафтах[138,139].

В заключение следует отметить, что антропогенное изменение климата приводит к фенологическим сдвигам как в наземных, так и в водных экосистемах. Эти сдвиги могут формировать фенологические несоответствия с серьезными последствиями для отдельных людей, популяций, сообществ и целых экосистем. Изменение климата ускоряется слишком быстро, чтобы многие виды могли адаптироваться за счет своей естественной фенологической способности[140]. Сохранение целостности функционирующего биологического разнообразия, прекращение разрушения среды обитания и восстановление экосистем укрепит природные системы, от которых мы зависим. Однако без постоянных усилий по радикальному сокращению выбросов парниковых газов эти меры лишь отсрочат потерю этих важнейших экосистемных услуг. Чтобы виды и экосистемы соответствовали ускоренным ритмам, заданным изменением климата, потребуются время и возможность для достижения новых гармоний.

Производство продуктов питания и фенология

Все сезонные виды деятельности изначально сопряжены с риском: от жаркой погоды, вызывающей неурожай пшеницы, или волн морской жары, влияющих на местные запасы рыбы, до несезонных погодных условий, влияющих на путешествия и туризм. Но наиболее важной социально-экономической деятельностью, на которую влияют фенологические сдвиги по мере ускорения изменения климата, является производство продуктов питания[2].

Тенденции к потеплению на протяжении десятилетий привели к смещению фенологических стадий различных основных культур на разных континентах[71,141-145]. Изменение стадий роста влияет на урожайность и качество урожая[144-147]. Сдвиги наблюдались в различных культурах, начиная от таких зерновых, как ячмень, кукуруза, рис, рожь, сорго, соя и пшеница, и заканчивая хлопком, виноградом и такими фруктовыми деревьями, как яблоня, вишня, груша и манго[71,143,148-154]. В то же время на фенологию урожая оказывают прямое влияние решения о сроках посева и выборе сорта культуры[71,155]. Такие решения часто используют в качестве стратегии адаптации для противодействия обусловленным изменением климата фенологическим сдвигам[71].

При постоянном внедрении новых сортов и изменениях в календаре посева методы ведения сельского хозяйства и климат оказывают совокупное влияние на разнообразные изменения в фенологии сельскохозяйственных культур[71,151,155-160].

Многие высокопродуктивные регионы страдают от связанных с климатом участившихся экстремальных явлений, которые также препятствуют критическим стадиям роста[161]. Модели развития сельскохозяйственных культур, основанные на климатических сценариях, дают прогнозы снижения урожайности во многих регионах мира, что вызовет дополнительные проблемы, связанные с деградацией почв, неустойчивым земледелием, вредителями и нехваткой воды[162].

Методы адаптации сосредоточены на внедрении устойчивого управления, включая использование органических удобрений, сочетание бобовых культур с травами, оптимизацию ирригации, выборочную селекцию растений и выбор более устойчивых сортов[71]. Прогнозы продуктивности сельского хозяйства часто включают в себя адаптацию к изменению климата с призывом к укреплению мониторинга эффективности методов адаптации[161].

Рыболовство

Успешный рост рыб до половозрелости и производство рыбных запасов сильно зависит от вызванных климатом изменений в фенологии и распределении как рыбы, так и кормов[67]. Для многих видов морских рыб фенология нереста чувствительна к температурным сигналам[69,163]. Критическими факторами раннего развития и выживания являются время нереста, последующая транспортировка рыбных личинок на стадии планктона и обилие подходящего корма[43,67,164,165]. Снижение выживаемости на ранних стадиях жизни приводит к уменьшению пополнения взрослой популяции[59]. У видов, важных для внутреннего и морского рыболовства в некоторых регионах, наблюдаются и прогнозируются изменения времени размножения и миграции и возникающие в результате фенологические несоответствия с доступностью кормов[166].

Изменения фенологии видов и условий окружающей среды, обусловленные изменением климата, создают проблемы для управления рыболовством[166]. В связи с наблюдаемыми временными сдвигами критических жизненных стадий и географического распространения рыбохозяйственные органы применяют такие привычные методы, как закрытие промысловых сезонов и районов, что может не дать надлежащей защиты[59,163,166]. Меры управления и ограничения должны учитывать существующие и формирующиеся критические факторы среды обитания, а также изменения в местах нереста, нагула и в миграционных коридорах. Для устойчивого управления рыболовством в устойчивых экосистемах необходим общий экосистемный подход, адаптирующийся как к изменению климата, так и к изменениям окружающей среды[166].

Внутреннее рыболовство

Характер осадков и снегопадов, меняющийся с изменением климата, влияет на наличие, качество и режимы стока пресной воды. Это важные фенологические сигналы для видов в пресноводных местах обитания, поскольку изменения потока и уровня воды, а также наводнения влияют на сроки миграции и нереста[166-168].

Морские волны тепла

Интенсивная морская волна тепла в 2012 году нагрела воды Северной Атлантики на 1-3°C, вызвав фенологическую реакцию у омаров и серьезно повлияв на рыболовство в заливе Мэн. Из-за повышения температуры омары раньше срока мигрировали к берегу, быстрее линяли и достигали размера, разрешенного для лова. Более продолжительный рыболовный сезон, чрезмерный вылов и недостаточный рост рыночного спроса привели к падению цен[169].

Исход сардин

Ежегодно происходит массовая сезонная миграция перуанской сардины (*Sardinops sagax*) из вод умеренного климата мыса Игольного в субтропические воды у северного побережья Квазулу-Натала в Южной Африке. С мая по июль это явление привлекает множество сопутствующих им морских хищников, а также рыбаков и туристов[170].

Записи за 60 лет свидетельствуют о прогрессирующих сроках задержки прибытия сардин из Дурбана на 1,3 дня каждое десятилетие. Эта задержка по времени совпадает с изменением порога температурного диапазона для сардин, когда изотерма 21°C сместилась на юг[170]. Если эта тенденция сохранится, то популяция сардин не сможет больше распространяться так далеко на север, или в долгосрочной перспективе популяция сардин может исчезнуть, что повлияет на популяцию хищников, рыболовство и туризм[170,171].

Список литературы

1. Lieth, H. (1974). Purposes of a Phenology Book. In *Phenology and Seasonality Modeling. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Lieth H. (ed.). Springer, Berlin, Heidelberg. Vol. 8. https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8_1
2. Liang, L. (2019). Phenology. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11739-7
3. Flynn, D.F.B. and Wolkovich, E.M. (2018). Temperature and photoperiod drive spring phenology across all species in a temperate forest community. *New Phytologist* 219(4), 1353-1362. https://doi.org/10.1111/nph.15232
4. Adole, T., Dash, J., Rodriguez-Galiano, V. and Atkinson, P.M. (2019). Photoperiod controls vegetation phenology across Africa. *Communications Biology,* 2, 391. https://doi.org/10.1038/s42003-019-0636-7
5. Ren, S., Vitasse, Y., Chen, X., Peichl, M. and An, S. (2022). Assessing the relative importance of sunshine, temperature, precipitation, and spring phenology in regulating leaf senescence timing of herbaceous species in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 313, 108770. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108770
6. Gienapp, P., Hemerik, L. and Visser, M.E. (2005). A new statistical tool to predict phenology under climate change scenarios. *Global Change Biology* 11(4), 600–606. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00925.x
7. Way, D.A. and Montgomery, R.A. (2014). Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world. *Plant, Cell & Environment* 38(9), 1725-1736. https://doi.org/10.1111/pce.12431
8. Forrest, J.R.K. (2016). Complex responses of insect phenology to climate change. *Current Opinion in Insect Science* 17, 49-54. https://doi.org/10.1016/j.cois.2016.07.002
9. Marshall, K.E., Gotthard,K. and Williams, C.M. (2020). Evolutionary impacts of winter climate change on insects. *Current Opinion in Insect Science* 41, 54-62. https://doi.org/10.1016/j.cois.2020.06.003
10. Wang, H., Wang, H., Ge, Q. and Dai, J. (2020) The Interactive Effects of Chilling, Photoperiod, and Forcing Temperature on Flowering Phenology of Temperate Woody Plants. *Frontiers in Plant Science* 11(443), 1-12. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00443
11. Bowman, D.M.J.S., Kolden, C.A., Abatzoglou, J.T., Johnston, F.H., van der Werf, G.R., Flannigan, M. (2020). Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 500–515. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3
12. Keeley, J.E. and Fotheringham, C.J. (2000). Role of fire in regeneration from seed. In *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*. Fenner, M. (Eds.). CABI. Chapter 14. 311-330. https://doi.org/10.1079/9780851994321.0311
13. Bailly, D., Agostinho, A.A. and Suzuki, H.I. (2008). Influence of the flood regime on the reproduction of fish species with different reproductive strategies in the Cuiabá River, Upper Pantanal, Brazil. *River Research and Applications* 24(9), 1218-1219. https://doi.org/10.1002/rra.1147
14. Arevalo, E., Maire, A., Tétard, S., Prévost, E., Lange, F., Marchand, F. *et al.* (2021). Does global change increase the risk of maladaptation of Atlantic salmon migration through joint modifications of river temperature and discharge? *Proceedings of the Royal Society B* 288(1964), 20211882. http://doi.org/10.1098/rspb.2021.1882
15. Teichert, N., Benitez, J.P., Dierckx, A., Tétard, S., De Oliveira, E., Trancart, T., Feunteun, E. and Ovidio, M. (2020). Development of an accurate model to predict the phenology of Atlantic salmon smolt spring migration. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 30(8), 1552-1565. https://doi.org/10.1002/aqc.3382
16. Chambers, L.E., Altwegg, R., Barbraud, C., Barnard, P., Beaumont, L.J. *et al*. (2013) Phenological Changes in the Southern Hemisphere. *PLOS ONE* 8(10), e75514. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075514
17. Butt, N., Seabrook, L., Maron, M., Law, B.S., Dawson, T.P., Syktus, J. *et al*. (2015). Cascading effects of climate extremes on vertebrate fauna through changes to low-latitude tree flowering and fruiting phenology. *Global Change Biology* 21(9), 3267-3277. https://doi.org/10.1111/gcb.12869
18. Sheldon, K.S. (2019). Climate Change in the Tropics: Ecological and Evolutionary Responses at Low Latitudes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 50, 303–33. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-025005

19. Morellato, L.P.C., Alberton, B., Alvarado, S.T., Borges, B., Buisson, E., Camargo, M.G.G. *et al.* (2016). Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation* 195, 60-72. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.033

20. Ramaswami, G., Datta, A., Reddy, A., and Quader, S. (2018). Tracking phenology in the tropics and in India: the impacts of climate change. In *Biodiversity and Climate Change: An Indian Perspective*. Bhatt, J.R., Das, A. and Shanker, K. (eds.). 45-69. New Delhi: Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Government of India. https://www.ncf-india.org/other/1116

21. Sakai, S. and Kitajima, K. (2019). Tropical phenology: Recent advances and perspectives. *Ecological Research*, 34(1), 50-54. https://doi.org/10.1111/1440-1703.1131

22. Parmesan, C. and Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421(6918), 37-42. https://doi.org/10.1038/nature01286

23. Thackeray, S.J., Sparks, T.H., Frederiksen, M., Burthe, S., Bacon, P.J., Bell, J.R. *et al.* (2010). Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. *Global Change Biology* 16(12), 3304-3313. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02165.x

24. Donnelly, A., Caffarra, A. and O'Neill, B.F. (2011). A review of climate-driven mismatches between interdependent phenophases in terrestrial and aquatic ecosystems. *International Journal of Biometerology* 55(6), 805-817. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0426-5

25. Stevenson, T.J., Visser, M.E., Arnold, W., Barrett, P., Biello, S., Dawson, A. *et al*. (2015). Disrupted seasonal biology impacts health, food security and ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282(1817), 20151453. https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1453

26. Kharouba, H.M., Ehrlén, J., Gelman, A., Bolmgren, K., Allen, J.M., Travers, S.E. and Wolkovich, E.M. (2018). Global shifts in the phenological synchrony of species interactions over recent decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115(20), 5211–5216. https://doi.org/10.1073/pnas.1714511115

27. Chmura, H.E., Kharouba, H.M., Ashander, J., Ehlman, S.M., Rivest, E.B. and Yang, L.H. (2019). The mechanisms of phenology: the patterns and processes of phenological shifts. *Ecological Monographs* 89(1), e01337. https://doi.org/10.1002/ecm.1337

28. Stemkovski, M., Pearse, W.D., Griffin, S.R., Pardee, G.L., Gibbs, J., Griswold, T. *et al.* (2020). Bee phenology is predicted by climatic variation and functional traits. *Ecology Letters* 23(11), 1589-1598. https://doi.org/10.1111/ele.13583

29. Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. and Pounds, J.A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421(6918), 57-60. https://doi.org/10.1038/nature01333

30. Parmesan, C. (2007). Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology* 13(9), 1860–1872. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x

31. Poloczanska, E.S., Brown, C.J., Sydeman, W.J., Kiessling, W., Schoeman, D.S., Moore, P.J. *et al.* (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change* 3(10), 919-925. https://doi.org/10.1038/nclimate1958

32. Poloczanska, E.S., Burrows, M.T., Brown, C.J., Molinos, J.G., Halpern, B.S., Hoegh-Guldberg, O. *et al.* (2016). Responses of marine organisms to climate change across oceans. *Frontiers in Marine Science* 3(62). https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00062

33. Renner, S.S. and Zohner, C.M. (2018). Climate change and phenological mismatch in trophic interactions among plants, insects, and vertebrates. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 49, 165-182. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062535

34. Visser, M.E. and Gienapp, P. (2019). Evolutionary and demographic consequences of phenological mismatches. *Nature Ecology & Evolution* 3(6), 879-885. https://doi.org/10.1038/s41559-019-0880-8

35. Staggemeier, V.G.,Camargo, M.G.G., Diniz-Filho, J.A.F., Freckleton, R., Jardim, L. and Morellato, L.P.C. (2019). The circular nature of recurrent life cycle events: a test comparing tropical and temperate phenology. *Journal of Ecology* 108(2), 393-404. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13266

36. World Meteorological Organization (2021). FAQs - El Niño/La Niña. https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions/el-niño-la-niña. Accessed 22 January 2021.

37. Detto, M., Wright, S.J., Calderón, O. and Muller-Landau, H.C. (2018). Resource acquisition and reproductive strategies of tropical forest in response to the El Niño–Southern Oscillation. *Nature Communications* 9, 913. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03306-9

38. Moriuchi E. and Basil, M. (2019). The Sustainability of Ohanami Cherry Blossom Festivals as a Cultural Icon. *Sustainability* 11(6), 1820. https://doi.org/10.3390/su11061820

39. Aono, Y. and Kazui, K. (2008). Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. *International Journal of Climatology* 28(7), 905-914. https://doi.org/10.1002/joc.1594

40. Aono, Y. and Saito, S. (2010). Clarifying springtime temperature reconstructions of the medieval period by gap-filling the cherry blossom phenological data series at Kyoto, Japan. *International Journal of Biometeorology* 54, 211-219. https://doi.org/10.1007/s00484-009-0272-x

41. Aono, Y. (2015). Cherry blossom phenological data since the seventeenth century for Edo (Tokyo), Japan, and their application to estimation of March temperatures. *International Journal of Biometeorology* 59, 427–434. https://doi.org/10.1007/s00484-014-0854-0

42. Primack, R.B., Higuchi, H. and Miller-Rushing, A.J. (2009). The impact of climate change on cherry trees and other species in Japan. *Biological Conservation* 142(9),1943-1949. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.03.016

43. Edwards, M. and Richardson, A.J. (2004). Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430, 881–84. https://doi.org/10.1038/nature02808

44. Cleland, E.E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A. and Schwartz, M.D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution* 22(7), 357-365. https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003

45. Morellato, L.P.C., Camargo, M.G.G. and Gressler, E. (2013). A review of plant phenology in South and Central America. In *Phenology: an integrative environmental science*. Schwartz, M.D. (eds.). Chapter 6. 91–113. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_6

46. Vitasse, Y., Signarbieux, C. and Fu, Y.H. (2018). More uniform spring phenology across elevations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115(5), 1004-1008. https://doi.org/10.1073/pnas.1717342115

47. Staudinger, M.D., Mills, K.E., Stamieszkin, K., Record, N.R., Hudak, C.A. *et al.* (2019). It's about time: a synthesis of changing phenology in the Gulf of Maine ecosystem. *Fisheries Oceanography* 28(5), 532–566. https://doi.org/10.1111/fog.12429

48. Gérard, M., Vanderplanck, M., Wood, T. and Michez, D. (2020). Global warming and plant–pollinator mismatches. *Emerging Topics in Life Sciences* 4(1), 77–86. https://doi.org/10.1042/ETLS20190139

49. Iler, A.M., CaraDonna, P.J., Forrest, J.R.K. and Post, E. (2021). Demographic Consequences of Phenological Shifts in Response to Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 52, 221–245. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-011921-032939

50. Lima, D.F., Mello, J.H.F., Lopes, I.T., Forzza, R.C., Goldenberg, R. and Freitas, L. (2021). Phenological responses to climate change based on a hundred years of herbarium collections of tropical Melastomataceae. *PLOS ONE* 16(5), e0251360. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251360

51. Vitasse, Y., Ursenbacher, S., Klein, G., Bohnenstengel, T., Chittaro, Y., Delestrade, A. *et al.* (2021). Phenological and elevational shifts of plants, animals and fungi under climate change in the European Alps. *Biological Reviews* 96(5),1816–1835. https://doi.org/10.1111/brv.12727

52. Visser, M.E., Noordwijk, A.V., Tinbergen, J.M. and Lessells, C.M. (1998). Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits (Parus major). *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 265(1408), 1867-1870. https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0514

53. Both, C. and Visser, M.E. (2001). Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. *Nature* 411(6835), 296–298. https://doi.org/10.1038/35077063

54. Visser, M.E., Holleman, L.J.M. and Gienapp, P. (2006). Shifts in caterpillar biomass phenology due to climate change and its impact on the breeding biology of an insectivorous bird. *Oecologia* 147, 164–172. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0299-6

55. Visser, M.E., te Marvelde, L. and Lof, M.E. (2012). Adaptive phenological mismatches of birds and their food in a warming world. *Journal of Ornithology* 153(1), 75–84. https://doi.org/10.1007/s10336-011-0770-6

56. Regular, P.M., Hedd, A., Montevecchi, W.A., Robertson, G.J., Storey, A.E. and Walsh, C.J. (2014). Why timing is everything: Energetic costs and reproductive consequences of resource mismatch for a chick-rearing seabird. *Ecosphere* 5(12), 1-13. https://doi.org/10.1890/es14-00182.1

57. Moyes, K., Nussey, D.H., Clements, M.N., Guinness, F.E., Morris, A., Morris, S. *et al.* (2011). Advancing breeding phenology in response to environmental change in a wild red deer population. *Global Change Biology* 17(7), 2455–2469. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02382.x

58. Tomotani, B.M., van der Jeugd, H., Gienapp, P., de la Hera, I., Pilzecker, J., Teichmann, C. and Visser, M.E. (2018). Climate change leads to differential shifts in the timing of annual cycle stages in a migratory bird. *Global Change Biology* 24(2), 823-835. https://doi.org/10.1111/gcb.14006

59. Asch, R.G., Stock, C.A. and Sarmiento, J.L. (2019). Climate change impacts on mismatches between phytoplankton blooms and fish spawning phenology. *Global Change Biology* 25(8), 2544–2559. https://doi.org/10.1111/gcb.14650

60. Asch, R.G. (2015). Climate change and decadal shifts in the phenology of larval fishes in the California Current ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112(30), E4065-E4074. https://doi.org/10.1073/pnas.1421946112

61. Asch, R.G. (2019). Changing seasonality of the sea: past, present, and future. In *Predicting Future Oceans, Sustainability of Ocean and Human Systems Amidst Global Environmental Change*. Cisneros-Montemayor, A.M., Cheung, W.W.L. and Ota, Y. (eds.). Chapter 4. 39-51. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817945-1.00004-6

62. Dahl, J., Dannewitz, J., Karlsson, L., Petersson, E., Löf, A. and Ragnarsson, B. (2004). The timing of spawning migration: implications of environmental variation, life history, and sex. *Canadian Journal of Zoology* 82(12), 1864–1870. https://doi.org/10.1139/z04-184

63. Li, Y., Cohen, J.M. and Rohr, J.R. (2013). Review and synthesis of the effects of climate change on amphibians. *Integrative Zoology* 8(2), 145-161. https://doi.org/10.1111/1749-4877.12001

64. Nash, L.N., Antiqueira, P.A.P., Romero, G.Q., de Omena, P.M. and Kratina, P. (2021). Warming of aquatic ecosystems disrupts aquatic–terrestrial linkages in the tropics. *Journal of Animal Ecology* 90(7), 1623-1634. https://doi.org/10.1111/1365-2656.13505

65. Post, E. and Forchhammer, M.C. (2008). Climate change reduces reproductive success of an Arctic herbivore through trophic mismatch. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363(1501), 2367-2373. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2207

66. Plard, F., Gaillard, J.M., Coulson, T., Hewison, A.M., Delorme, D., Warnant, C. and Bonenfant, C. (2014). Mismatch between birth date and vegetation phenology slows the demography of roe deer. *PLoS Biology* 12(4), e1001828. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001828

67. Brander, K. (2010). Impacts of climate change on fisheries. *Journal of Marine Systems* 79(3-4), 389-402. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.12.015

68. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018). *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: Synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. http://www.fao.org/3/i9705en/I9705EN.pdf

69. Rogers, L.A. and Dougherty, A.B. (2019). Effects of climate and demography on reproductive phenology of a harvested marine fish population. *Global Change Biology* 25(2), 708-720. https://doi.org/10.1111/gcb.14483

70. Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D. and Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology* 248, 60-69. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005

71. Fatima, Z., Ahmed, M., Hussain, M., Abbas, G., Ul-Allah, S., Ahmad, S. *et al.* (2020). The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options. *Scientific Reports* 10(1), 18013. https://doi.org/10.1038/s41598-020-74740-3

72. Perrins, C.M. (1991). Tits and their caterpillar food supply. *Ibis* 133(1), 49-54. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1991.tb07668.x

73. Van Asch, M., Tienderen, P.H., Holleman, L.J.M. and Visser, M.E. (2007). Predicting adaptation of phenology in response to climate change, an insect herbivore example. *Global Change Biology* 13(8), 1596–1604. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01400.x

74. Visser, M.E., Gienapp, P., Husby, A., Morrisey, M., de la Hera, I., Pulido, F. *et al*. (2015). Effects of spring temperatures on the strength of selection on timing of reproduction in a long-distance migratory bird. *PLoS Biology* 13(4), e1002120. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002120

75. Charmantier, A., Mccleery, R.H., Cole, L.R., Perrins, C., Kruuk, L.E.B. and Sheldon, B.C. (2008). Adaptive Phenotypic Plasticity in Response to Climate Change in a Wild Bird Population. *Science* 320(5877), 800-803. https://doi.org/10.1126/science.1157174

76. Visser, M.E., Lindner, M., Gienapp, P., Long, M.C. and Jenouvrier, S. (2021). Recent natural variability in global warming weakened phenological mismatch and selection on seasonal timing in great tits (*Parus major*). *Proceedings of the Royal Society B* 288(1963), 20211337. https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1337

77. Bauer, Z., Trnka, M., Bauerová, J., Možný, M., Štěpánek, P., Bartošová, L. *et al*. (2010). Changing climate and the phenological response of great tit and collared flycatcher populations in floodplain forest ecosystems in Central Europe. *International Journal of Biometeorology* 54, 99–111. https://doi.org/10.1007/s00484-009-0259-7

78. Matthysen, E., Adriaensen, F. and Dhondt, A.A. (2010). Multiple responses to increasing spring temperatures in the breeding cycle of blue and great tits (*Cyanistes caeruleus, Parus major*). *Global Change Biology* 17(1), 1-16. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02213.x

79. Bonamour, S. (2021). Great tit response to climate change. *Nature Climate Change* 11, 802-807. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01160-0

80. Cole, E.F., Regan, C.E. and Sheldon, B.C. (2021). Spatial variation in avian phenological response to climate change linked to tree health. *Nature Climate Change* 11, 872–878. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01140-4

81. Robinson, R.A., Crick, H.Q.P., Learmonth, J.A., Maclean, I.M.D., Thomas, C.D., Bairlein, F. *et al*. (2009). Travelling through a warming world: climate change and migratory species. *Endangered Species Research* 7(2), 87-99. https://doi.org/10.3354/esr00095

82. Joly, K., Gurarie, E., Sorum, M.S., Kaczensky, P., Cameron, M.D., Jakes, A.F. *et al*. (2019). Longest terrestrial migrations and movements around the world. *Scientific Reports* 9, 15333. https://doi.org/10.1038/s41598-019-51884-5

83. Intergovernmental Panel on Climate Change (2019). Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/

84. Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

85. Ramp, C., Delarue, J., Palsbøll, P.J., Sears, R. and Hammond, P.S. (2015). Adapting to a Warmer Ocean—Seasonal Shift of Baleen Whale Movements over Three Decades. *PLOS ONE* 10(3), e0121374. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121374

86. Kubelka, V., Sandercock, B.K., Székely, R. and Freckleton, R.P. (2022). Animal migration to northern latitudes: environmental changes and increasing threats. *Trends in Ecology & Evolution* 37(1), 30-41. https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.08.010

87. Saino, N., Ambrosini, R., Rubolini, D., von Hardenberg, J., Provenzale, A., Hüppop, K. *et al*. (2011). Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 278(1707), 835–842. https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1778

88. Secretariat of the Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals (2014). *A Review of Migratory Bird Flyways and Priorities for Management.* https://www.cms.int/sites/default/files/publication/CMS_Flyways_Reviews_Web.pdf

89. Lamaris, *et al*. (2018). Arctic geese tune migration to a warming climate but still suffer from a phenological mismatch. *Current Biology* 28(15), 2467–2473. https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.077

90. Bairlein, F. (2016). Migratory birds under threat. *Science* 354(6312), 547-548. https://doi.org/10.1126/science.aah6647

91. The Zoological Society of London (ZSL) (2010*). Climate change impacts on migratory species - The path ahead*. https://www.cbd.int/cop/cop-10/doc/unep-cms-cop10-cc-en.pdf.

92. Secretariat of the Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals (2022). *Ecological Connectivity*. https://www.cms.int/en/topics/ecological-connectivity

93. BirdLife International (2021*). IUCN Red List for birds*. http://datazone.birdlife.org/species/factsheet/white-stork-ciconia-ciconia/text

94. Jovani, R. AND Tella, J.L. (2004) Age-related environmental sensitivity and weather mediated nestling mortality in white storks *Ciconia ciconia*. *Ecography* 27(5), 611–618. https://www.jstor.org/stable/3683463

95. Tobolka, M., Zolnierowicz, K.M. and Reeve, N.F. (2015). The effect of extreme weather events on breeding parameters of the White Stork *Ciconia ciconia. Bird Study* 62(3), 377-385. https://doi.org/10.1080/00063657.2015.1058745

96. Culbertson, K.A., Garland, M.S., Walton, R.K., Zemaitis, L. and Pocius, V.M. (2021). Long-term monitoring indicates shifting fall migration timing in monarch butterflies (*Danaus plexippus*). *Global Change Biology* 28(3), 727-738. https://doi.org/10.1111/gcb.15957

97. Taylor, O.R., Lovett, J.P., Gibo, D.L., Weiser, E.L., Thogmartin, W.E., Semmens, D.J. *et al.* (2019). Is the timing, pace, and success of the monarch migration associated with sun angle? *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 442. https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00442

98. Lameris, T.K., van der Jeugd, H.P., Eichhorn, G., Dokter, A.M., Bouten, W., Boom, M.P. *et al*. (2018). Arctic geese tune migration to a warming climate but still suffer from a phenological mismatch. *Current Biology*, *28*(15), 2467-2473. https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.077

99. Robinson, N.J., Valentine, S.E., Tomillo, P.S., Saba, V.S., Spotila, J.R. and Paladino, F.V. (2014). Multidecadal trends in the nesting phenology of Pacific and Atlantic leatherback turtles are associated with population demography. *Endangered Species Research*, 24(3), 197-206. https://doi.org/10.3354/esr00604

100. Patrício, A.R., Hawkes, L.A., Monsinjon, J.R., Godley, B.J. and Fuentes, M.M.P.B. (2021). Climate change and marine turtles: recent advances and future directions. *Endangered Species Research* 44, 363-395. https://doi.org/10.3354/esr01110

101. Almpanidou, V., Katragkou, E. and Mazaris, A.D. (2017). The efficiency of phenological shifts as an adaptive response against climate change: a case study of loggerhead sea turtles (Caretta caretta) in the Mediterranean. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 23(7), 1143–1158. https://doi.org/10.1007/s11027-017-9777-5

102. Butler, C.J. (2019). A Review of the Effects of Climate Change on Chelonians. *Diversity*11(8), 138. https://doi.org/10.3390/d11080138

103. Monsinjon, J., Lopez-Mendilaharsu, M., Lara, P., Santos, A., dei Marcovaldi, M.A., Girondot, M. and Fuentes, M.M. (2019). Effects of temperature and demography on the phenology of loggerhead sea turtles in Brazil. *Marine Ecology Progress Series*, *623*, 209-219. https://doi.org/10.3354/meps12988

104. Moore, S.E., Haug, T., Víkingsson, G.A. and Stenson, G.B. (2019). Baleen whale ecology in arctic and subarctic seas in an era of rapid habitat alteration. *Progress in Oceanography* 176, 102118. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.05.010

105. Avila, I.C., Dormann, C.F., García, C., Payán, L.F. and Zorrilla, M.Z. (2020). Humpback whales extend their stay in a breeding ground in the Tropical Eastern Pacific. *ICES Journal of Marine Science* 77(1), 109–118. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz251

106. Szesciorka, A.R., Ballance, L.T., Širović, A., Rice, A., Ohman, M.D., Hildebrand, J.A. and Frank, P.J.S. (2020). Timing is everything: Drivers of interannual variability in blue whale migration. *Scientific Reports* 10, 7710. https://doi.org/10.1038/s41598-020-64855-y

107. Both, C., Artemyev, A.V., Blaauw, B., Cowie, R.J., Dekhuijzen, A.J., Eeva, T. *et al.* (2004). Large–scale geographical variation confirms that climate change causes birds to lay earlier. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 271(1549), 1657–1662. https://doi.org/10.1098/rspb.2004.2770

108. Dunham, A.E., Razafindratsima, O.H., Rakotonirina, P., Wright, P.C. (2018). Fruiting phenology is linked to rainfall variability in a tropical rain forest. *Biotropica* 50(3), 396-404. https://doi.org/10.1111/btp.12564

109. Suonan, J., Classen, A.T., Sanders, N.J. and He, J.S. (2019). Plant phenological sensitivity to climate change on the Tibetan Plateau and relative to other areas of the world. *Ecosphere* 10(1), e02543. https://doi.org/10.1002/ecs2.2543

110. Bradshaw, A.D. (1965). Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. *Advances in Genetics* 13, 115–155. https://doi.org/10.1016/S0065-2660(08)60048-6

111. Charmantier, A. and Gienapp, P. (2014). Climate change and timing of avian breeding and migration: evolutionary versus plastic changes. *Evolutionary Applications* 7(1), 15–28. https://doi.org/10.1111/eva.12126

112. Zettlemoyer, M.A. and Peterson, M.L. (2021). Does Phenological Plasticity Help or Hinder Range Shifts Under Climate Change? *Frontiers in Ecology and Evolution* 9, 392. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.689192

113. Visser, M.E. (2008). Keeping up with a warming world: assessing the rate of adaptation to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 275(1635), 649-659. https://doi.org/10.1098/rspb.2007.0997

114. Van Asch, M., Salis, L., Holleman, L.J., Van Lith, B. and Visser, M.E. (2013). Evolutionary response of the egg hatching date of a herbivorous insect under climate change. *Nature Climate Change* 3(3), 244–248. https://doi.org/10.1038/nclimate1717

115. Helm, B., Van Doren, B.M., Hoffmann, D. and Hoffmann, U. (2019). Evolutionary response to climate change in migratory pied flycatchers. *Current Biology* 29(21), 3714-3719. https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.072

116. Diffenbaugh, N.S. and Field, C.B. (2013). Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science* 341(6145), 486–492. https://doi.org/10.1126/science.1237123

117. Hoffmann, A.A. and Sgrò, C.M. (2011). Climate change and evolutionary adaptation. *Nature* 470(7335), 479-85. https://doi.org/10.1038/nature09670.

118. Tabor, G. (2019). Ecological connectivity: A bridge to preserving biodiversity. In U*NEP Frontiers 2018/19 – Emerging issues of environmental concern*. United Nations Environment Programme, Nairobi. https://www.unep.org/frontiers

119. BirdLife International (2018*). Species factsheet: Calidris canutus*. http://datazone.birdlife.org/species/factsheet/red-knot-calidris-canutus. Accessed on 09 December 2021.

120. van Gils, J.A., Lisovski, S., Lok, T., Meissner, W., Ożarowska, A., de Fouw, J. *et al.* (2016). Body shrinkage due to Arctic warming reduces red knot fitness in tropical wintering range. *Science* 352(6287), 819-821. https://doi.org/10.1126/science.aad6351

121. Bowden, J.J., Eskildsen, A., Hansen, R.R., Olsen, K., Kurle, C.M. and Høye, T.T. (2015). High-Arctic butterflies become smaller with rising temperatures. *Biology Letters* 11(10), 20150574. http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2015.0574

122. Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects.* Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

123. Mäder, P., Boho, D., Rzanny, M., Seeland, M., Wittich, H.C., Deggelmann, A. *et al*. (2021). The Flora Incognita app – Interactive plant species identification. *Methods in Ecology and Evolution* 12(7), 1335-1342. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13611

124. Renner, S.S. and Chmielewski, F.M. (2022). The International Phenological Garden network (1959 to 2021): its 131 gardens, cloned study species, data archiving, and future. *International Journal of Biometeorology* 66(1), 35-43. https://doi.org/10.1007/s00484-021-02185-y

125. Huang, H., Liao, J., Zhang, Z. and Zhan, Q. (2017). Ex situ flora of China. *Plant Diversity* 39(6), 357-364. https://doi.org/10.1016/j.pld.2017.12.001

126. The GLOBE Program (2021). GLOBE Impact Around the World. https://www.globe.gov/about/impact-and-metrics. Accessed 24 Dec 2021.

127. Murphy, T., Riebeek Kohl, H., Ristvey Jr, J.D., Chambers, L.H., and Bourgeault, J. (2018). Global citizen science using the GLOBE Program. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AGUFMED54A..03M/abstract

128. Dickinson, J.L., Zuckerberg, B. and Bonter, D.N. (2010). Citizen science as an ecological research tool: challenges and benefits. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 41(1), 149–172. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144636

129. Langham, G.M., Schuetz, J.G., Distler, T., Soykan, C.U. and Wilsey, C. (2015). Conservation Status of North American Birds in the Face of Future Climate Change. *PLOS ONE* 10(9), e0135350. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135350

130. Castex, V., Beniston, M., Calanca, P., Fleury, D. and Moreau, J. (2018). Pest management under climate change: The importance of understanding tritrophic relations. *Science of The Total Environment* 616-617, 397-407. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.027

131. Marcinkowski, P. and Piniewski, M. (2019). Effect of climate change on sowing and harvest dates of spring barley and maize in Poland. *International Agrophysics* 32(2), 265-271. https://doi.org/10.1515/intag-2017-0015

132. Bai, H., Xiao, D., Zhang, H., Tao, F. and Hu, Y. (2019). Impact of warming climate, sowing date, and cultivar shift on rice phenology across China during 1981–2010. *International Journal of Biometeorology* 63(8), 1077–1089. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01723-z

133. Acevedo, M., Pixley, K., Zinyengere, N., Meng, S., Tufan, H., Cichy, K. *et al*. (2020). A scoping review of adoption of climate-resilient crops by small-scale producers in low-and middle-income countries. *Nature Plants* 6(10), 1231-1241. https://doi.org/10.1038/s41477-020-00783-z

134. Zilberman, D., Lipper, L., McCarthy, N., and Gordon, B. (2018). Innovation in response to climate change. In *Climate smart agriculture*. Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M. *et al.* (Eds). Springer, Cham. Vol 52. 49-74. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61194-5

135. Enquist, C.A., Kellermann, J.L., Gerst, K.L. and Miller-Rushing, A.J. (2014). Phenology research for natural resource management in the United States. *International Journal of Biometeorology* 58(4), 579–589. https://doi.org/10.1007/s00484-013-0772-6

136. Kharouba, H.M. and Wolkovich, E.M. (2020). Disconnects between ecological theory and data in phenological mismatch research. *Nature Climate Change* 10(5), 406-415. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0752-x.

137. Seddon, N., Turner, B., Berry, P., Chausson, A. and Girardin, C.A.J. (2019). Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nature Climate Change* 9(2), 84–87. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0405-0

138. Prober, S.M., Doerr, V.A.J., Broadhurst, L.M., Williams, K.J. and Dickson, F. (2019). Shifting the conservation paradigm: a synthesis of options for renovating nature under climate change. *Ecological Monographs* 89(1), e01333. https://doi.org/10.1002/ecm.1333

139. Bergstrom, D. M., Wienecke, B. C., van den Hoff, J., Hughes, L., Lindenmayer, D. B., Ainsworth, T. D. *et al.* (2021). Combating ecosystem collapse from the tropics to the Antarctic. *Global change Biology* 27(9), 1692-1703. https://doi.org/10.1111/gcb.15539

140. Radchuk, V., Reed, T., Teplitsky, C. Van De Pol, M., Charmantier, A., Hassall, C. *et al*. (2019). Adaptive responses of animals to climate change are most likely insufficient. *Nature Communications* 10, 3109. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10924-4

141. Estrella, N., Sparks, T.H. and Menzel, A. (2007). Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology* 13(8), 1737-1747. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01374.x

142. Wang, Z., Chen, J., Xing, F., Han, Y., Chen, F., Zhang, L. *et al*. (2017). Response of cotton phenology to climate change on the North China Plain from 1981 to 2012. *Scientific Reports* 7, 6628. https://doi.org/10.1038/s41598-017-07056-4

143. Abed, A., Bonhomme, M., Lacointe, A., Bourgeois, G. and Baali-Cherif, D. (2019). Climate change effect on the bud break and flowering dates of the apple trees in mountainous and plain regions of Algeria. *Advances in Horticultural Science* 33 (3), 417-431. https://doi.org/10.13128/ahs-24618

144. Chmielewski, F.-M., Müller, A. and Bruns, E. (2004). Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(1–2), 69-78. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00161-8

145. Tao, F., Yokozawa, M., Xu, Y., Hayashi, Y. and Zhang, Z. (2006). Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. *Agricultural and Forest Meteorology* 138(1-4), 82–92. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.014

146. Nguyen-Sy, T., Cheng, W., Tawaraya, K., Sugawara, K. and Kobayashi, K. (2019). Impacts of climatic and varietal changes on phenology and yield components in rice production in Shonai region of Yamagata Prefecture, Northeast Japan for 36 years. *Agronomy & Crop Ecology* 22(3), 382-394. https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1571421

147. Azmat, M., Ilyas, F., Sarwar, A., Huggel, C., Ashra, S.V., Hui, T. *et al*. (2021). Impacts of climate change on wheat phenology and yield in Indus Basin, Pakistan. *Science of The Total Environment* 790, 148221. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148221

148. Tomasi, D., Jones, G.V., Giust, M., Lovat, L. and Gaiotti, F. (2011). Grapevine Phenology and Climate Change: Relationships and Trends in the Veneto Region of Italy for 1964–2009. *American Journal of Enology and Viticulture* 62, 329-339. https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10108

149. Rajan, S. (2012). Phenological Responses to Temperature and Rainfall: A Case Study of Mango. In *Tropical Fruit Tree Species and Climate Change.* Sthapit, B.R., Ramanatha Rao, V. and Sthapit, S.R. (Eds.) Bioversity International, New Delhi, India. https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/105191

150. Xiao, D., Tao, F., Liu, Y., Shi, W., Wang, M., Liu, F. *et al*. (2013) Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981–2009. *International Journal of Biometeorology* 57, 275–285. https://doi.org/10.1007/s00484-012-0552-8

151. Ahmad, S., Abbas, G., Fatima, Z., Khan, R.J., Anjum, M.A., Ahmed, M. *et al*. (2017). Quantification of the impacts of climate warming and crop management on canola phenology in Punjab, Pakistan. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203(5), 442-452. https://doi.org/10.1111/jac.12206

152. Subedi, S. (2019). Climate change effects of Nepalese fruit production. *Advances in Plants & Agriculture Research* 9(1), 141-145. https://doi.org/10.15406/apar.2019.09.00426

153. Tan, Q., Liu, Y., Dai, L. and Pan, T. (2021). Shortened key growth periods of soybean observed in China under climate change. *Scientific Reports* 11, 8197. https://doi.org/10.1038/s41598-021-87618-9

154. Kunz, A. and Blanke, M. (2022). "60 Years on"—Effects of climatic change on tree phenology—A Case Study Using Pome Fruit. *Horticulturae* 8(2), 110. https://doi.org/10.3390/horticulturae8020110

155. Rezaei, E.E., Siebert, S. and Ewert, F. (2017). Climate and management interaction cause diverse crop phenology trends. *Agricultural and Forest Meteorology* 233, 55-70. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.003

156. Zhang, T., Huang, Y. and Yang, X. (2012). Climate warming over the past three decades has shortened rice growth duration in China and cultivar shifts have further accelerated the process for late rice. *Global Change Biology* 19(2), 563-570. https://doi.org/10.1111/gcb.12057

157. He, L., Asseng, S., Zhao, G., Wu, D., Yang, X., Zhuang, W. *et al*. (2015). Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology* 200, 135-143. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.001

158. Abbas, G., Ahmad, S., Ahmad, A., Nasim, W., Fatima, Z., Hussain, S. *et al*. (2017). Quantification the impacts of climate change and crop management on phenology of maize-based cropping system in Punjab, Pakistan. *Agricultural and Forest Meteorology* 247, 42-55. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.012

159. Karapinar, B. and Özertan, G. (2020). Yield implications of date and cultivar adaptation to wheat phenological shifts: a survey of farmers in Turkey. *Climatic Change* 158, 453–472. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02532-4

160. Liu, Y., Chen, Q., Ge, Q., Dai, J. and Dou, Y. (2018). Effects of climate change and agronomic practice on changes in wheat phenology. *Climatic Change* 150(3-4), 273-287. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2264-5

161. Porter, J.R., L. Xie, A.J., Challinor, K., Cochrane, S.M., Howden, M.M., Iqbal, D.B. *et al*. (2014) Food security and food production systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B. Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. *et al*. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 485-533. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

162. Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A. *et al*. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111(9), 3268-3273. https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110

163. Peer, A.C. and Miller, T.J. (2014). Climate Change, Migration Phenology, and Fisheries Management Interact with Unanticipated Consequences. *North American Journal of Fisheries Management* 34, 94–110, 2014. https://doi.org/10.1080/02755947.2013.847877

164. Doney, S.C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J.P., Chan, F., English, C.A. *et al*. (2012). Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review of Marine Science* 4(1), 11-37. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611

165. Thaxton, W., Taylor, J. and Asch, R. (2020). Climate-associated trends and variability in ichthyoplankton phenology from the longest continuous larval fish time series on the east coast of the United States. *Marine Ecology Progress Series* 650, 269–287. https://doi.org/10.3354/meps13404

166. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018). *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: Synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. http://www.fao.org/3/i9705en/I9705EN.pdf

167. Krabbenhoft, T.J., Platania, S.P. and Turner, T.F. (2014). Interannual variation in reproductive phenology in a riverine fish assemblage: implications for predicting the effects of climate change and altered flow regimes. *Freshwater Biology* 59(8), 1744-1754. https://doi.org/10.1111/fwb.12379

168. Woods, T., Kaz, A. and Giam, X. (2021). Phenology in freshwaters: a review and recommendations for future research. *Ecography*(44), 1-14. https://doi.org/10.1111/ecog.05564

169. Mills, K., Pershing, A., Brown, C., Chen, Y., Chiang, F.-S., Holland, D. *et al*. (2013). Fisheries management in a changing climate: Lessons from the 2012 ocean heat wave in the Northwest Atlantic. *Oceanography* 26(2), 191–195. https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.27

170. Fitchett, J.M., Grab, S.W. and Portwig, H. (2019). Progressive delays in the timing of sardine migration in the southwest Indian Ocean. *South Africa Journal of Science* 115(7/8), 5887. https://doi.org/10.17159/sajs.2019/5887

171. Teske, P.R., Emami-Khoyi, A., Golla, T.R., Sandoval-Castillo, J., Lamont, T., Chiazzari, B. *et al*. (2021). The sardine run in southeastern Africa is a mass migration into an ecological trap. *Science Advances* 7(38), eabf4514. https://doi.org/10.1126/sciadv.abf4514

Графические ссылки

Выявление сдвигов, отслеживание тенденций

Растения

33. Renner and Zohner (2018)

Anderson, J.T., Inouye, D.W., McKinney, A.M., Colautti, R.I. and Mitchell-Olds, T. (2012). Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279(1743), 3843-3852. https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1051

Askeyev, O.V., Tischin, D., Sparks, T.H. and Askeyev, I.V. (2005). The effect of climate on the phenology, acorn crop and radial increment of pedunculate oak (*Quercus robur*) in the middle Volga region, Tatarstan, Russia. *International Journal of Biometeorology* 49(4), 262-266. https://doi.org/10.1007/s00484-004-0233-3

Ehrlén, J. and Valdés, A. (2020). Climate drives among-year variation in natural selection on flowering time. *Ecology Letters 23*(4), 653-662. https://doi.org/10.1111/ele.13468

Lambert, A.M., Miller-Rushing, A.J. and Inouye, D.W. (2010). Changes in snowmelt date and summer precipitation affect the flowering phenology of *Erythronium grandiflorum* (glacier lily; Liliaceae). *American Journal of Botany 97*(9), 1431-1437. https://doi.org/10.3732/ajb.1000095

Kudo, G. and Cooper, E.J. (2019). When spring ephemerals fail to meet pollinators: mechanism of phenological mismatch and its impact on plant reproduction. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 286*(1904), 20190573. https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0573

Насекомые

Konvicka, M., Benes, J., Cízek, O., Kuras, T. and Kleckova, I. (2016). Has the currently warming climate affected populations of the mountain ringlet butterfly, *Erebia epiphron* (Lepidoptera: Nymphalidae), in low-elevation mountains? *European Journal of Entomology* 113, 295. https://doi.org/10.14411/eje.2016.036

Macgregor, C.J., Thomas, C.D., Roy, D.B., Beaumont, M.A., Bell, J.R., Brereton, T. *et al*. (2019). Climate-induced phenology shifts linked to range expansions in species with multiple reproductive cycles per year. *Nature Communications* 10(1), 1-10. https://doi.org/10.1038/s41467-019-12479-w

Копытные

Froy, H., Martin, J., Stopher, K.V., Morris, A., Morris, S., Clutton-Brock, T.H. *et al*. (2019). Consistent within-individual plasticity is sufficient to explain temperature responses in red deer reproductive traits. *Journal of Evolutionary Biology* 32(11), 1194-1206. https://doi.org/10.1111/jeb.13521

Plard, F., Gaillard, J-M., Coulson, T., Hewison, A.J.M., Delorme, D., Warnant, C. *et al.* (2014). Mismatch between birth date and vegetation phenology slows the demography of roe deer. *PLOS Biology* 12, e1001828. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001828

Renaud, L.A., Pigeon, G., Festa-Bianchet, M. and Pelletier, F. (2019). Phenotypic plasticity in bighorn sheep reproductive phenology: from individual to population. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 73(4), 1-13. https://doi.org/10.1007/s00265-019-2656-1

Stopher, K.V., Bento, A.I., Clutton-Brock, T.H., Pemberton, J.M. and Kruuk, L.E. (2014). Multiple pathways mediate the effects of climate change on maternal reproductive traits in a red deer population. *Ecology 95*(11), 3124-3138. https://doi.org/10.1890/13-0967.1

Рыбы

Friedland, K.D., Reddin, D.G., McMenemy, J.R. and Drinkwater, K.F. (2003). Multidecadal trends in North American Atlantic salmon (*Salmo s*alar) stocks and climate trends relevant to juvenile survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60(5), 563-583. https://doi.org/10.1139/f03-047

Kennedy, R.J. and Crozier, W.W. (2010). Evidence of changing migratory patterns of wild Atlantic salmon *Salmo salar* smolts in the River Bush, Northern Ireland, and possible associations with climate change. *Journal of Fish Biology* 76(7), 1786-1805. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02617.x

Kovach, R.P., Joyce, J.E., Echave, J.D., Lindberg, M.S. and Tallmon, D.A. (2013). Earlier migration timing, decreasing phenotypic variation, and biocomplexity in multiple salmonid species. *PloS one* 8(1), e53807. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053807

Ohlberger, J., Thackeray, S.J., Winfield, I.J., Maberly, S.C. and Vøllestad, L.A. (2014). When phenology matters: age–size truncation alters population response to trophic mismatch. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281(1793), 20140938. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0938

Птицы

Arlt, D. and Pärt, T. (2017). Marked reduction in demographic rates and reduced fitness advantage for early breeding is not linked to reduced thermal matching of breeding time. *Ecology and Evolution* 7(24), 10782-10796. https://doi.org/10.1002/ece3.3603

Both, C. and Visser, M.E. (2005). The effect of climate change on the correlation between avian life-history traits. *Global Change Biology* 11(10), 1606-1613. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01038.x

D'Alba, L., Monaghan, P. and Nager, R.G. (2010). Advances in laying date and increasing population size suggest positive responses to climate change in common eiders *Somateria mollissima* in Iceland. *Ibis* 152(1), 19-28. https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2009.00978.x

de Villemereuil, P., Rutschmann, A., Ewen, J.G., Santure, A.W. and Brekke, P. (2019). Can threatened species adapt in a restored habitat? No expected evolutionary response in lay date for the New Zealand hihi. *Evolutionary Applications* 12(3), 482-497. https://doi.org/10.1111/eva.12727

Fletcher, K., Howarth, D., Kirby, A., Dunn, R. and Smith, A. (2013). Effect of climate change on breeding phenology, clutch size and chick survival of an upland bird. *Ibis* 155(3), 456-463. https://doi.org/10.1111/ibi.12055

Gaston, A.J., Gilchrist, H.G., Mallory, M.L. and Smith, P.A. (2009). Changes in seasonal events, peak food availability, and consequent breeding adjustment in a marine bird: a case of progressive mismatching. *The Condor* 111(1), 111-119. https://doi.org/10.1525/cond.2009.080077

Imlay, T.L., Mills, J., Saldanha, S., Wheelwright, N.T. and Leonard, M.L. (2018). Breeding phenology and performance for four swallows over 57 years: relationships with temperature and precipitation. *Ecosphere* 9(4), e02166. https://doi.org/10.1002/ecs2.2166

Kentie, R., Coulson, T., Hooijmeijer, J.C., Howison, R.A., Loonstra, A.J., Verhoeven, M.A. *et al*. (2018). Warming springs and habitat alteration interact to impact timing of breeding and population dynamics in a migratory bird. *Global Change Biology* 24(11), 5292-5303. https://doi.org/10.1111/gcb.14406

Ludwig, G.X., Alatalo, R.V., Helle, P., Lindén, H., Lindström, J. and Siitari, H. (2006). Short-and long-term population dynamical consequences of asymmetric climate change in black grouse. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 273(1597), 2009-2016. https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3538

McDermott, M.E. and DeGroote, L.W. (2016). Long-term climate impacts on breeding bird phenology in Pennsylvania, USA. *Global Change Biology* 22(10), 3304-3319. https://doi.org/10.1111/gcb.13363

McDermott, M.E. and DeGroote, L.W. (2017). Linking phenological events in migratory passerines with a changing climate: 50 years in the Laurel Highlands of Pennsylvania. *PLoS One* 12(4), e0174247. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174247

Moe, B., Stempniewicz, L., Jakubas, D., Angelier, F., Chastel, O., Dinessen, F. *et al*. (2009). Climate change and phenological responses of two seabird species breeding in the high-Arctic. *Marine Ecology Progress Series* 393, 235-246. https://doi.org/10.3354/meps08222

Møller, A.P. (2008). Climate change and micro-geographic variation in laying date. *Oecologia* 155(4), 845-857. https://doi.org/10.1007/s00442-007-0944-3

Nilsson, A.L.K., Slagsvold, T., Røstad, O.W., Knudsen, E., Jerstad, K., Cadahia, L. *et al*. (2019). Territory location and quality, together with climate, affect the timing of breeding in the white-throated dipper. *Scientific Reports* 9(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43792-5

Rosenfield, R.N., Hardin, M.G., Bielefeldt, J. and Keyel, E.R. (2017). Are life history events of a northern breeding population of Cooper's Hawks influenced by changing climate? *Ecology and Evolution* 7(1), 399-408. https://doi.org/10.1002/ece3.2619

Sanz, J.J., Potti, J., Moreno, J., Merino, S. and Frias, O. (2003). Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 9(3), 461-472. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00575.x

Sauve, D., Divoky, G. and Friesen, V.L. (2019). Phenotypic plasticity or evolutionary change? An examination of the phenological response of an arctic seabird to climate change. *Functional Ecology* 33(11), 2180-2190. https://doi.org/10.1111/1365-2435.13406

Schaefer, T., Ledebur, G., Beier, J. and Leisler, B. (2006). Reproductive responses of two related coexisting songbird species to environmental changes: global warming, competition, and population sizes. *Journal of Ornithology* 147(1), 47-56. https://doi.org/10.1007/s10336-005-0011-y

Vatka, E., Orell, M. and Rytkönen, S. (2011). Warming climate advances breeding and improves synchrony of food demand and food availability in a boreal passerine. *Global Change Biology* 17(9), 3002-3009. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02430.x

Visser, M.E., Gienapp, P., Husby, A., Morrisey, M., de la Hera, I., Pulido, F. *et al*. (2015). Effects of spring temperatures on the strength of selection on timing of reproduction in a long-distance migratory bird. *PLoS Biology* 13(4), e1002120. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002120

Watanuki, Y., Ito, M., Deguchi, T. and Minobe, S. (2009). Climate-forced seasonal mismatch between the hatching of rhinoceros auklets and the availability of anchovy. *Marine Ecology Progress Series* 393, 259-271. https://doi.org/10.3354/meps08264

Weatherhead, P.J. (2005). Effects of climate variation on timing of nesting, reproductive success, and offspring sex ratios of red-winged blackbirds. *Oecologia* 144(1), 168-175. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0009-4

Wegge, P. and Rolstad, J. (2017). Climate change and bird reproduction: warmer springs benefit breeding success in boreal forest grouse. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 284(1866), 20171528. https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1528

Летучие мыши

Linton, D.M. and Macdonald, D.W. (2018). Spring weather conditions influence breeding phenology and reproductive success in sympatric bat populations. *Journal of Animal Ecology* 87(4), 1080-1090. https://doi.org/10.1111/1365-2656.12832

Морские виды

31. Poloczanska *et al*. (2013)

32. Poloczanska *et al*. (2016)

ООН
программа по
окружающей среде
50
1972-2022

United Nations Avenue, Gigiri
P.O. Box 30552, 00100 Nairobi, Kenya
тел.: +254 20 762 1234
unep-publications@un.org
www.unep.org

«Передовые рубежи», 2022 г.

АКТУАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ