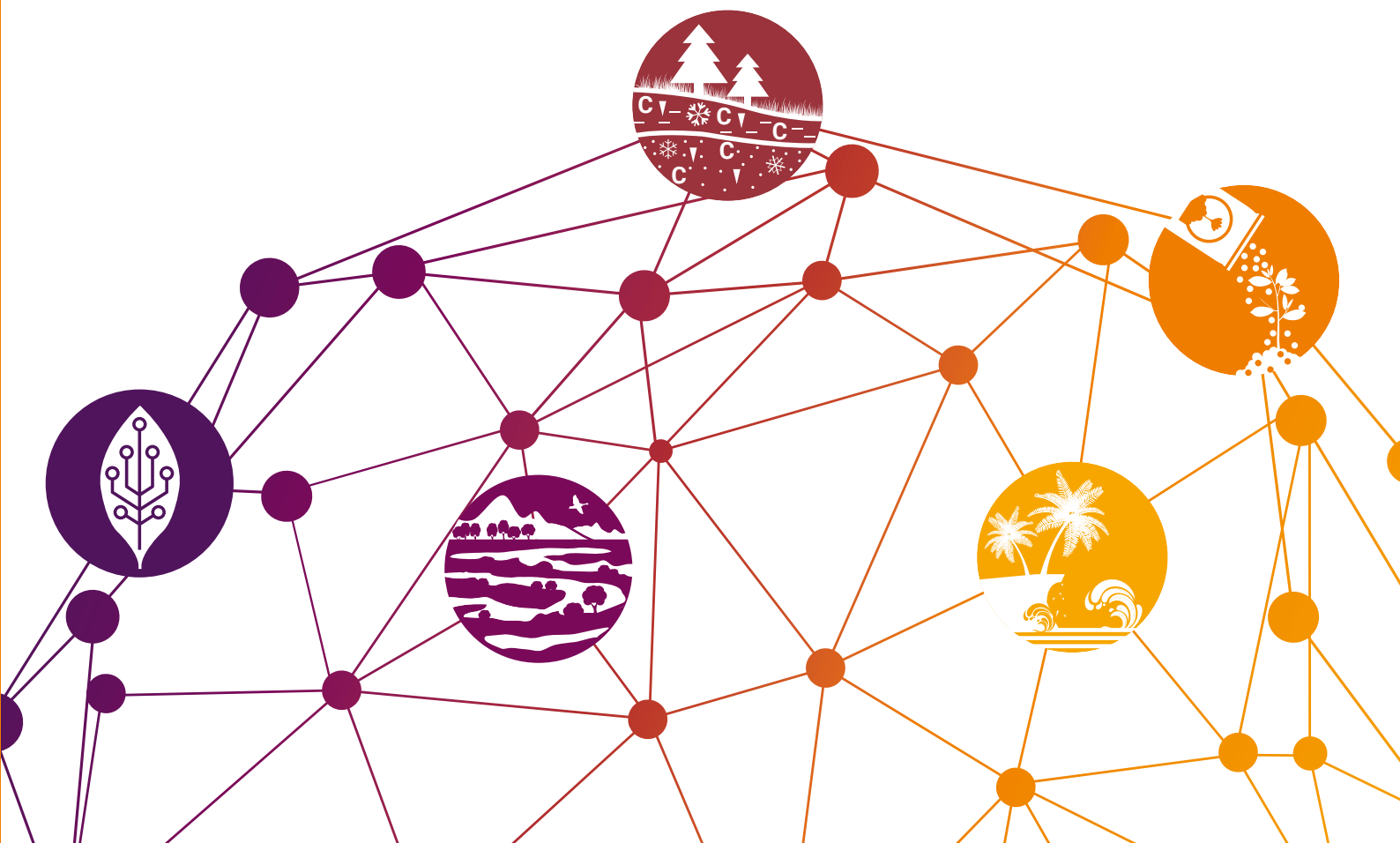


ПЕРЕДОВЫЕ РУБЕЖИ 2018/2019 ГОДА

Намечающиеся проблемы, имеющие экологическое измерение



© Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, 2019 г.
ISBN: 978-92-807-3739-4
Номер задания: DEW/2223/NA

Правовая оговорка

Настоящее издание может воспроизводиться полностью или частично и в любой форме для образовательных и некоммерческих целей без отдельного разрешения владельца авторских прав при условии обязательной ссылки на первоисточник. Программа ООН по окружающей среде будет признательна за направление ей одной копии каждой публикации, в которой настоящее издание используется в качестве источника.

Данная публикация не подлежит перепродаже или любому иному использованию в коммерческих целях без предварительного письменного разрешения Программы ООН по окружающей среде. Заявки о предоставлении такого разрешения, содержащие сведения о цели и тираже воспроизведения, следует направлять Директору Отдела коммуникации по адресу: Director, Communication Division, UN Environment, P.O. Box 30552 Nairobi, 00100 Kenya

Употребляемые обозначения и изложение материала в данной публикации не подразумевают выражения какого бы то ни было мнения со стороны Программы ООН по окружающей среде относительно правового статуса той или иной страны, территории или города, или их полномочных органов, или же относительно делимитации их границ или установления их пределов. С общими руководящими указаниями по вопросам, связанным с использованием приводимых в публикациях географических карт, можно ознакомиться по адресу: <http://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm>

Упоминание какой-либо коммерческой компании или продукции в настоящей публикации не подразумевает их одобрения со стороны Программы ООН по окружающей среде. Запрещается использовать информацию из этой публикации, касающуюся запатентованных продуктов, для популяризации или рекламы.

© Авторские права на географические карты, фотографии и иллюстрации указываются в подписях к ним.

Предлагаемое название для цитирования:

ЮНЕП (2019). Передовые рубежи 2018/2019 года: намечающиеся проблемы, имеющие экологическое измерение. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, Найроби.

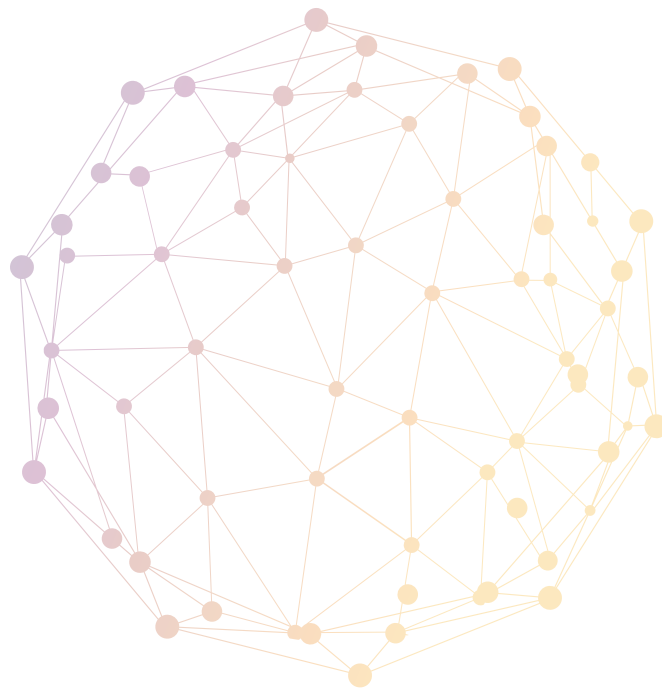
Производство

Отдел естественных наук
Программа ООН по окружающей среде
P.O. Box 30552
Nairobi, 00100, Kenya
Тел.: (+254) 20 7621234
Эл. почта: publications@unenvironment.org
Веб-сайт: www.unenvironment.org

Программа ООН
по окружающей среде
поощряет применение
экологически безопасных технологий
во всем мире и в своей деятельности.
Наши правила распространения печатных
изданий направлены на уменьшение
углеродного следа Программы ООН
по окружающей среде.

ПЕРЕДОВЫЕ РУБЕЖИ 2018/2019 ГОДА

Намечающиеся проблемы, имеющие экологическое измерение





Содержание

	Вступительное слово	7
	Выражение признательности	8
	Синтетическая биология: реконструирование окружающей среды	10
	Возможности и проблемы	10
	Переписывание кода жизни	12
	Новое использование прикладных технологий: от лаборатории к экосистеме	16
	Инновации требуют проявления мудрости	18
	Список использованной литературы	20
	Экологическая связность: мост к сохранению биоразнообразия	24
	Восстановление связности фрагментированных экосистем	24
	Движущие силы фрагментации	26
	Содействие внедрению решений, обеспечивающих связность	30
	Постановка целевых задач по обеспечению связности в будущем	32
	Список использованной литературы	34
	Вечномерзлые торфяники: теряя почву под ногами в теплеющем мире	38
	Ускорение изменений в Арктике	38
	Оттаивание вечной мерзлоты, разлагающийся торф и сложные взаимодействия	40
	Повышение осведомленности о вечномерзлых торфяниках	44
	Первоочередные задачи в области накопления знаний и расширения сетей взаимодействия	46
	Список использованной литературы	48
	Фиксация азота: от циклического загрязнения азотом к экономике, обеспечивающей рециркуляцию азота	52
	Глобальная проблема азота	52
	Общеизвестные и предполагаемые свойства азота	54
	Раздробленность политики и решения, направленные на формирование многооборотной экономики	58
	На пути к целостному международному подходу в отношении азота	60
	Список использованной литературы	62
	Плохая адаптация к изменению климата: как не попасть в западню на пути сохранения способности к эволюционному развитию	66
	Определение адаптации и плохой адаптации в контексте изменения климата	66
	Нарастание проблем плохой адаптации	68
	Предотвращение плохой адаптации в условиях ограничения глобального потепления не более чем на 1,5°C	73
	Список использованной литературы	74



Вступительное слово



В первом десятилетии XX-го века два немецких химика — Фриц Габер и Карл Бош — разработали способ недорогого и крупномасштабного производства синтетического азота. Благодаря этому изобретению началось массовое производство удобрений на основе азота, которое преобразовало сельское хозяйство по всему миру. Наряду с этим оно ознаменовало собой начало нашего долгосрочного вмешательства в баланс азота на Земле. В настоящее время ежегодные потери химически активного азота в окружающую среду оцениваются в 200 млрд долл. США, и это приводит к деградации наших земель, загрязняет воздух, которым мы дышим, и служит спусковым крючком распространения «мертвых зон» и токсичного цветения водорослей в наших водотоках.

Поэтому неудивительно, что многие ученые утверждают, что нынешнюю геологическую эру следует официально именовать эпохой «антропоцена». Всего за несколько десятилетий деятельность человека стала причиной ускорения темпов роста среднемировой температуры, которая повышается в 170 раз быстрее, чем в природных условиях. Более 75 процентов всей поверхности суши на нашей планете подверглось планомерному

изменению, а более 93 процентов всех рек навсегда изменили свое течение. Мы не только стали причиной кардинальных перемен в биосфере, но и обрели способность переписывать код структурных элементов, из которых состоят живые организмы, более того, научились создавать их практически с нуля.

Каждый год сеть ученых, специалистов и учреждений со всего мира ведет работу под эгидой Программы ООН по окружающей среде в целях выявления и анализа назревающих проблем, которые окажут глубокое воздействие на наше общество, экономику и окружающую среду. Одни из этих проблем неразрывно связаны с новыми удивительными технологиями, которые находят прикладное применение и несут непредсказуемые риски, тогда как другие являются вечными вопросами, как, например, фрагментация девственных ландшафтов и оттаивание вечномерзлой почвы. Загрязнение окружающей среды азотом является еще одной проблемой, ставшей непредвиденным последствием десятилетий деятельности человека в биосфере. Наконец, плохая адаптация к изменению климата — последняя из проблем, проанализированных в настоящем докладе, подчеркивает нашу неспособность адекватно и надлежащим образом приспособиться к меняющемуся вокруг нас миру.

Однако есть и хорошие новости, о которых следует рассказать. На следующих страницах читатель может узнать о том, что в решении глобальной проблемы регулирования круговорота азота в природе начинает формироваться целостный подход. В Китае, Индии и Европейском союзе предпринимаются новые многообещающие шаги, направленные на сокращение потерь и повышение эффективности азотных удобрений. В конечном итоге рекуперация и рециклирование азота, равно как и других ценных питательных веществ и материалов, может способствовать переводу сельского хозяйства на принципы экологически безопасного и устойчивого развития — отличительной черты подлинно многооборотной экономики.

Проблемы, исследованные в докладе «Передовые рубежи», должны служить напоминанием о том, что где бы мы ни вмешивались в природные процессы — будь то в мировом масштабе или на молекулярном уровне — мы рискуем создать долгосрочные факторы воздействия на наш общепланетарный дом. Но действуя предусмотрительно и работая вместе, мы можем упредить возникновение этих проблем и разработать такие решения, которые будут служить нам всем на благо будущих поколений.

Джойс Мсуйя

И. о. Директора-исполнителя

Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде

Выражение признательности

Синтетическая биология: реконструирование окружающей среды

Ведущие авторы

Бартоломей Колодзейчик, компания «H2SG Energy Pte. Ltd.», Сингапур

Натали Кофлер, Йельский институт биосферных исследований, Йельский университет, штат Коннектикут, Соединенные Штаты Америки

Соавторы и рецензенты

Марианела Арайя, Секретариат Конвенции о биологическом разнообразии, Монреаль, Канада

Джеймс Булл, Факультет естественных наук, Техасский университет в Остине, штат Техас, Соединенные Штаты Америки

Джексон Чемпер, Департамент биологической статистики и вычислительной биологии, Корнеллский университет, штат Нью-Йорк, Соединенные Штаты Америки

Чэнь Лю, Департамент биологической статистики и вычислительной биологии, Корнеллский университет, штат Нью-Йорк, Соединенные Штаты Америки

Ёнгют Ютавон, Национальное агентство по научно-техническому развитию Таиланда, Патхумтхани, Таиланд

Экологическая связность: мост к сохранению биоразнообразия

Ведущий автор

Гэри Табор, Центр по сохранению крупных ландшафтов, штат Монтана, Соединенные Штаты Америки

Соавторы и рецензенты

Майя Банкова-Тодорова, Фонд сохранения видов Мохаммеда bin Зайеда, Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты

Камило Андрес Корреа Айрам, Научно-исследовательский институт биологических ресурсов им. Александра фон Гумбольдта, Богота, Колумбия

Летисия Коуту Гарсия, Федеральный университет Мату-Гросу-ду-Сул, Кампу-Гранди, Бразилия

Валери Капос, Программа ООН по окружающей среде — Всемирный центр мониторинга охраны природы, Кембридж, Великобритания

Эндрю Олдз, Факультет естественных наук и инженерного дела, Университет Солнечного берега, Маручидор, Австралия

Илеана Ступариу, Географический факультет, Бухарестский университет, Румыния

Вечномерзлые торфяники: теряя почву под ногами в теплеющем мире

Ведущий автор

Ханс Юстен, Грайфсвальдский университет / Грайфсвальдский центр по изучению болот, Грайфсвальд, Германия

Соавторы и рецензенты

Дианна Копански, Программа ООН по окружающей среде, Найроби, Кения

Дэвид Олефельдт, Факультет сельскохозяйственных, биологических и экологических наук, Альбертский университет, Эдмонтон, Канада

Дмитрий Стрелецкий, Географический факультет, Университет Джорджа Вашингтона, Вашингтон, округ Колумбия, Соединенные Штаты Америки

Фиксация азота: от циклического загрязнения азотом к экономике, обеспечивающей рециркуляцию азота

Ведущие авторы

Марк Саттон, Центр по экологии и гидрологии, Эдинбург, Великобритания

Нандула Рагхурам, Университет Индрапрастха Гуру Гобинд Сингха, Нью-Дели, Индия

Тапан Кумар Адхья, Калингский институт промышленных технологий, Бхубанешвар, штат Одisha, Индия

Соавторы и рецензенты

Джилл Бэрн, Геологическая служба США, штат Колорадо, Соединенные Штаты Америки

Кристофер Кокс, Программа ООН по окружающей среде, Найроби, Кения

Вим де Врис, Вагенингенский университет и научно-исследовательский центр, Вагенинген, Нидерланды

Кевин Хикс, Стокгольмский институт окружающей среды, Йорк, Великобритания

Клэр Ховард, Центр по экологии и гидрологии, Эдинбург, Великобритания

Сяотан Цзюй, Факультет сельскохозяйственных ресурсов и экологических наук, Китайский сельскохозяйственный университет, Пекин, Китай

Дэвид Кантер, Колледж искусств и наук, Нью-Йоркский университет, штат Нью-Йорк, США

Карджел Массо, Международный институт тропического сельского хозяйства, Ибадан, Нигерия
Жан Пьер Ометто, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия
Рамеш Рамачандран, Национальный центр по устойчивому управлению прибрежной зоной, Министерство окружающей среды, леса и изменения климата, Ченнаи, Индия
Ханс Ван Гринсвен, Нидерландское агентство экологических оценок (PBL), Гаага, Нидерланды
Вилфрид Винивартер, Международный институт прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия

Плохая адаптация к изменению климата: как не попасть в западню на пути сохранения способности к эволюционному развитию

Ведущий автор

Кэтрин МакМюллен, Стокгольмский институт окружающей среды, Бангкок, Таиланд

Соавторы и рецензенты

Томас Даунинг, Глобальное партнерство по адаптации к изменению климата, Оксфорд, Великобритания
Энтони Патт, Институт экологических решений, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцария
Бернадетт Ресуррексьон, Стокгольмский институт окружающей среды, Бангкок, Таиланд
Джессика Трони, Программа ООН по окружающей среде, Найроби, Кения

Особой благодарности заслуживают:

Александра Бартельмес и Косима Тебетмейер, Грайфсвальдский центр по изучению болот, Германия; Марин Клиндер, Национальный центр данных по исследованию снега и льда, штат Колорадо, Соединенные Штаты Америки; Саломея Чаманджи, Дэвид Коул, Никольен Деланж, Анджелина Джампу, Филип Дрост, Вирджиния Гитари, Цзянь Лю, Ариана Маджини, Нада Матта, Полин Муго, Сюзан Мутеби-Ричардс, Шари Ниджман, Андреас Обрехт, Сэмюэл Опийо, Мозес Осани, Роксанна Самий, Раджиндер Сиан, Нандита Сурендран и Жозефина Вамбуа, Программа ООН по окружающей среде.

Консультанты по производству

Маартен Каппелле и Эдоардо Дзандри, Программа ООН по окружающей среде.

Производственная группа

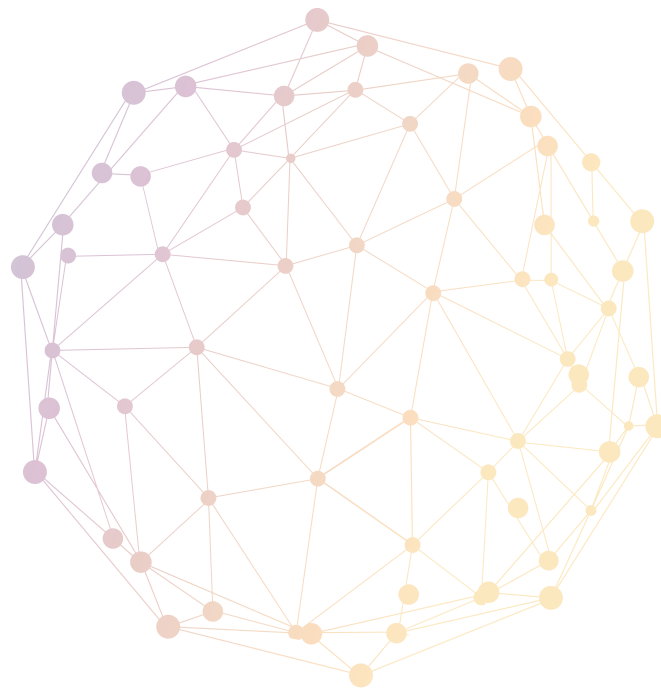
Главный редактор: Пинья Сарасас, Программа ООН по окружающей среде
Техническая поддержка: Аллан Лелей, Программа ООН по окружающей среде
Выпускающий редактор: Александра Хортон, Великобритания

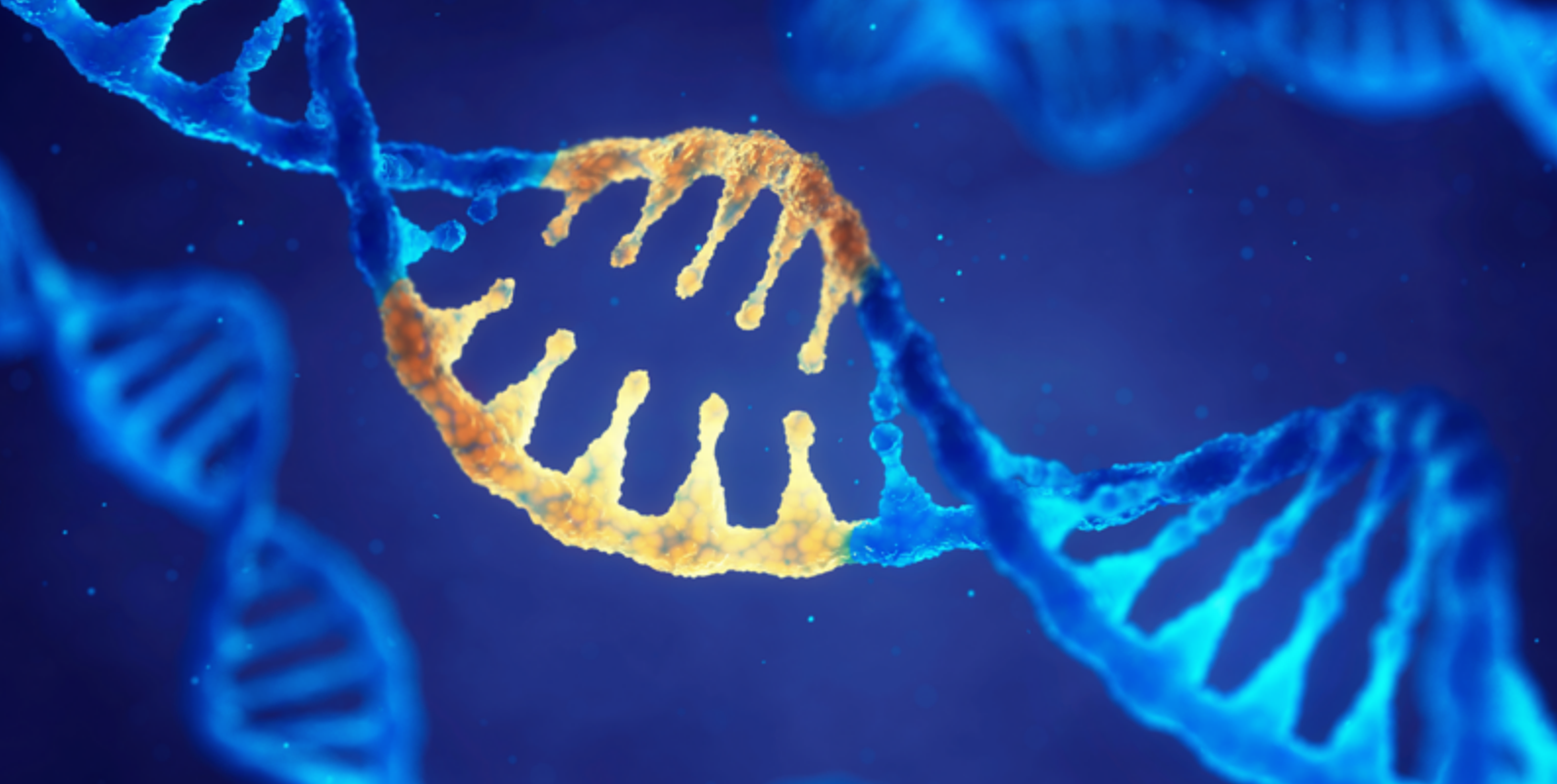
Художественно-графическое оформление и верстка

Художник-оформитель: Одри Ринглер, Программа ООН по окружающей среде
Картограф: Джейн Муриити, Программа ООН по окружающей среде

Печать

ЮНОН / Секция типографских услуг / Найроби, сертифицировано по стандарту ISO14001:2004





Фотография предоставлена: nobeastsofierce/Shutterstock.com

Синтетическая биология: реконструирование окружающей среды

Возможности и проблемы

На пути построения здорового и устойчивого будущего мир сталкивается с беспрецедентными проблемами. Разрушение среды обитания, инвазивные виды и чрезмерная эксплуатация способствуют значительному ускорению процессов утраты биоразнообразия.¹ Нерациональная практика ведения работ в добывающих отраслях накладывает дополнительное бремя на окружающую среду и тем самым подрывает благосостояние человека. Трансмиссивные инфекционные заболевания создают серьезную угрозу для глобального здравоохранения.² Стремительное изменение климата, вероятно, расширит географический диапазон тропических болезней и еще больше усилит нагрузку на уже подавляемые биологические виды и экосистемы.³

Ряд предлагаемых и уже реализованных подходов, призванных обеспечить решение этих проблем, основываются на общей стратегии. А именно: они предполагают проведение генетических манипуляций с живыми организмами, чтобы те обрели новые, еще

не существующие в природе признаки, с тем чтобы способствовать удовлетворению потребностей человека. Ученые могут модифицировать микроорганизмы, такие как *E. coli*, переписывая их генетический код, с тем чтобы превратить их в крошечные живые фабрики, производящие биотопливо.⁴ Как пекарские дрожжи, так и *E. coli* можно переделать под выработку адипиновой кислоты — химического вещества, получаемого из нефти, которое играет ключевую роль в изготовлении нейлона, — и таким образом создать альтернативу производственным процессам, основанным на переработке нефти.^{5,6} Пекарские дрожжи можно также перепрограммировать для целей получения артемизинина — противомаларийного лекарственного средства, обычно получаемого из полыни однолетней.⁷ Все вышеперечисленное является примером продуктов, которые можно получить, применяя методы передовой гено-инженерной технологии, получившей название «синтетическая биология».

Большинство имеющихся в свободной продаже биосинтетических продуктов были разработаны в целях создания альтернатив дорогостоящим сырьевым товарам, присутствующим на



Фотография предоставлена: BASF

Янтарная кислота представляет собой ценное химическое вещество, которое используется в пищевой, фармацевтической и химической промышленности. Как показано выше, бактерия *Bacillus pasteurii*, обитающая в рубце крупного рогатого скота, является природной бактерией, вырабатывающей янтарную кислоту. Для обеспечения промышленного производства янтарной кислоты в эту бактерию при помощи методов геномной инженерии внесены изменения, повышающие ее продуктивность. Увеличение 4000x.

рынке, особенно тем, которые зависят от цепочки поставок нефтепродуктов и невозобновляемых ресурсов.⁸ Наряду с этим все большее распространение в научных исследованиях и на рынках получают синтетические альтернативы и заменители веществ, традиционно добываемых из природных источников.⁹⁻¹² Компания «Модерн Мэдоу», стоящая за изобретением вырабатывающих коллагены дрожжей, преследует цель стать поставщиком экологически устойчивого альтернативного материала для кожевенной промышленности, который будет обладать свойствами и текстурой, аналогичными выделанной коже животных.¹¹ Кроме того, синтетическая биология открывает новые перспективы в области создания передовых материалов с неизвестными ранее функциональными возможностями и эксплуатационными качествами, таких как самособирающиеся или саморемонтируемые материалы.¹³

Недавнее появление метода CRISPR (произносится как «криспер» и является акронимом от «clustered regularly interspaced short palindromic repeats» — «короткие палиндромные повторы, регулярно расположенные группами») как одного из инструментов геномного редактирования открыло путь к реализации еще более точных и недорогостоящих способов конструирования отдельно взятых организмов, биологических систем и целых геномов.^{14,15} Применение достижений синтетической биологии выходит за рамки лабораторных манипуляций с микробами и ведет к разработке методов распространения биологических видов вне контролируемых условий для достижения конкретных целей. В качестве средства искоренения переносчиков болезней, ликвидации инвазивных видов и повышения жизнестойкости растений и животных, находящихся под угрозой исчезновения,

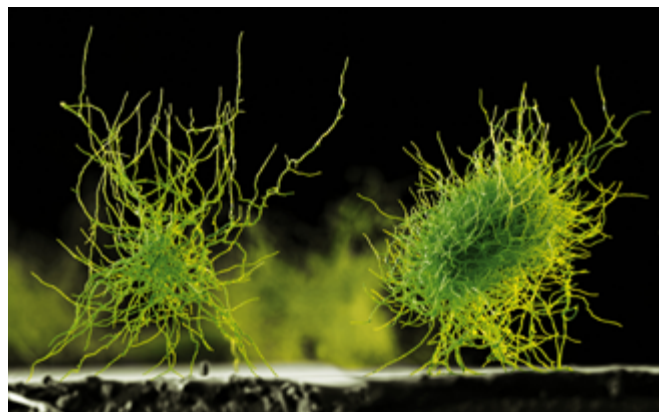


Участники Конвенции о биологическом разнообразии считают нижеприведенное рабочее определение полезным в качестве отправной точки в целях оказания содействия научно-техническим обсуждениям в рамках Конвенции и протоколов к ней.

«**Синтетическая биология** определяется как дальнейшее развитие и новое направление современной биотехнологии, которое объединяет науку, технологию и инженерию, чтобы облегчать и ускорять понимание, разработку, реконструкцию, производство и/или модификацию генетических материалов, живых организмов и биологических систем».²⁰

предлагаются стратегии высвобождения генно-инженерных организмов в окружающую среду с целью внесения необратимых изменений в целые популяции целевых видов.¹⁶

Преднамеренное или случайное высвобождение генно-инженерных организмов в окружающую среду могло бы оказать значительное негативное воздействие как на здоровье человека, так и на состояние окружающей среды. Ненадлежащее использование этих технологий и неспособность учесть непреднамеренные последствия могут нанести необратимый экологический ущерб и создать значительные геополитические угрозы.¹⁷ Имеющиеся у синтетической биологии возможности оказания значительного долгосрочного воздействия требуют разработки методов государственного управления и руководящих принципов научных исследований, которые способствуют ее ответственному использованию с соблюдением всех этических норм.^{18,19}



Фотография предоставлена: BASF

В естественных условиях плесневый грибок *Aspergillus niger* способен вырабатывать ферменты, которые имеют коммерческую ценность и используются в промышленном производстве продуктов питания и кормов для животных. Этот микроорганизм был генетически модифицирован для обеспечения промышленного производства ферментов. Увеличение 180x.

Переписывание кода жизни

Развитие технологии рекомбинирования ДНК в 1970-х годах ознаменовало собой крупный сдвиг в том, как люди осуществляют контроль над геномами.²¹ Технологии генетического секвенирования позволяют считать и расшифровывать участки ДНК, намечая план реконструирования геномов в целях экспрессии новых генов. Последовательности ДНК могут быть полностью переписаны путем удаления, добавления или замены ее сегментов. Целевые участки ДНК теперь могут быть химически синтезированы и собраны воедино, что приводит к созданию синтетической жизни.²²

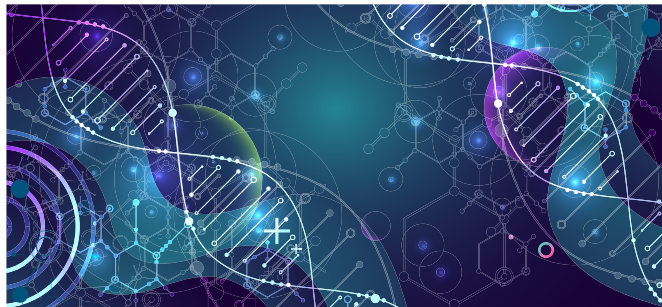
Новейший инструмент геномного редактирования CRISPR-Cas9 вызвал значительный ажиотаж как в научном сообществе, так и среди широкой общественности. Впервые описанный в 2012 году, механизм CRISPR позволяет редактировать геномы быстрее, дешевле, точнее и эффективнее, чем любой из его предшественников.^{23,24} Этот метод ускоряет процесс редактирования с нескольких месяцев до всего нескольких дней.^{25,26}

В основу методики геномного редактирования CRISPR-Cas9 была положена природная система иммунного ответа определенных видов бактерий на вторжение вирусов.^{27,28} В природе бактерия может использовать фермент Cas9 для того, чтобы отрезать инвазивный генетический материал, введенный вирусом, тем самым эффективно нейтрализуя нападение. Исследователи адаптировали этот механизм, с тем чтобы получить возможность разрезать ДНК в любом конкретном месте. При редактировании генов на основе методики CRISPR-Cas9 ученые используют направляющую РНК, которая обеспечивает попадание фермента Cas9 на точно заданный участок ДНК.

Затем фермент Cas9 действует как молекулярные ножницы, вырезая или удаляя целевой сегмент. Используя естественный процесс репарации ДНК, исследователи также могут вставлять специально сконструированный сегмент ДНК в разорванную нить.²⁹

Этот процесс редактирования можно сравнить с определением местонахождения и точным вырезанием конкретного слова или

Видеоматериал:
Что такое синтетическая биология?



Фотография предоставлена: Omelchenko / Shutterstock.com
 Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=rDSuNAMbDaQ>

© techNyouvids

Программа развития любого живого организма записана в его ДНК. Эта программа управляет производством белков, без которых функционирование организма невозможно.

ДНК, или дезоксирибонуклеиновая кислота, состоит из четырех нуклеотидных оснований, связанных парами.

Аденин всегда образует пару с **Тимином**

Цитозин всегда образует пару с **Гуанином**



Точно так же, как то или иное сочетание букв образует слово, имеющее определенное значение, та или иная последовательность **As, Ts, Gs и Cs**, соединенных в конкретном порядке, образует ген, который кодирует производство конкретного типа белка, необходимого для выполнения конкретной функции в организме.

Когда в последовательности ДНК случается **«орфографическая ошибка»** (мутация), это оказывает влияние на структуру и функцию синтезируемых белков. В результате «ошибок» в последовательности ДНК клетка может стать


Ученые могут определить точный порядок этих букв посредством **секвенирования ДНК**. Полный набор человеческой ДНК, или генома человека, содержит 3 миллиарда комбинаций или пар оснований.



На протяжении десятилетий методы генной инженерии использовались для модификации организмов путем изменения местоположения генетических материалов, например в генетически модифицированных организмах (ГМО), когда ген одного вида изолируется и переносится в неродственный вид с целью достижения желаемой характеристики в организме-мишени.


 **2,7 миллиарда** пар оснований


 **651 миллион** пар оснований

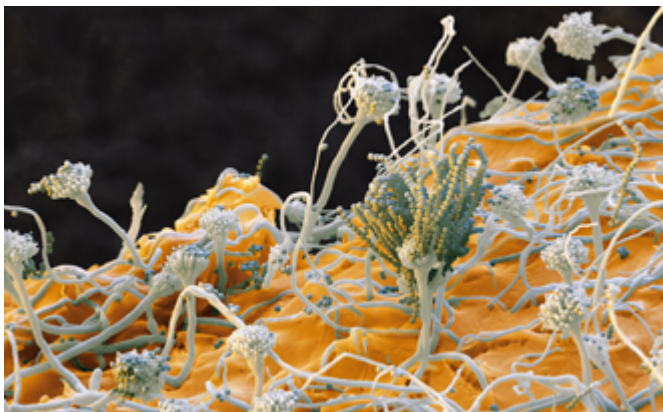
 **12 миллионов** пар оснований (пекарские дрожжи)

 **278 миллионов** пар оснований

Синтетическая биология — это следующий уровень генной инженерии: исследования уже не ограничиваются манипуляциями с естественными генетическими материалами, а предполагают программирование и построение новых биологических систем с использованием искусственно синтезированной ДНК.

 В 2010 году, после десятилетнего освоения методов проектирования, синтеза и сборки последовательности ДНК практически с нуля, ученые объявили о своем успехе в создании первой в мире синтетической бактериальной клетки.

 Используя естественный геном пекарских дрожжей в качестве образца, консорциум ученых в настоящее время ведет работу по созданию дрожжевой клетки на основе полностью синтетической ДНК.



Фотография предоставлена: BASF

Сферические споры, которые образует грибок *Emericella nidulans*, покрыты слоем водоотталкивающего белка, который известен под названием гидрофобин. Ген, отвечающий за выработку гидрофобина, был введен в бактерии *E. coli* для массового производства этого белка в коммерческих целях. Увеличение 400х.

предложения из документа и, при желании, его заменой новой фразой. В настоящее время метод CRISPR используется для того, чтобы исправлять вызывающие заболевания мутации у людей, придавать сельскохозяйственным культурам новые признаки и синтезировать ранее не существовавшие микроорганизмы.¹⁴ Среди последних разработок можно отметить использование методики CRISPR-Cas13 для редактирования РНК вместо ДНК.³⁰

Редактирование генов с помощью метода CRISPR используется в научных исследованиях, направленных на изменение организмов, которые живут в естественных условиях за пределами контролируемой человеком среды. Создание *генных драйвов* представляет собой одно из прикладных направлений синтетической биологии, основанных на геномном редактировании методом CRISPR в целях обеспечения экспрессии желаемых изменений в генах будущих поколений биологических видов, живущих в дикой природе.³¹ Этот процесс включает в себя создание организма в лабораторных условиях в целях кодирования генного драйва на основе CRISPR и искомого редактирования геномов. Затем этот организм высвобождается для спаривания с особями нормальной популяции в условиях дикой природы, вынуждая их потомство наследовать целевой отредактированный ген вместе с системой генного драйва. Передача генного драйва — это самовоспроизводящийся процесс, который повторяется всякий раз, когда потомство спаривается с особями из дикой популяции. И со временем вся популяция этого биологического вида станет носителем как желаемого гена, так и системы генного драйва. Наряду с этим генный драйв на основе CRISPR может обеспечить наследование признаков, нарушающих процесс размножения, например стерильности, которая может распространяться в популяции и потенциально привести к ее исчезновению. Применение генных драйвов на основе CRISPR в наибольшей степени подходит для биологических видов с половым размножением и непродолжительным временем жизни одного поколения, к которым относится большинство насекомых, а также некоторые грызуны.³²

Методика геномного редактирования CRISPR-Cas9

В естественных условиях CRISPR-Cas9 — это стратегия самозащиты бактерий и их иммунитет от вирусных атак, основанные на системном решении, которое обеспечивает точное определение и вырезание ДНК вторгающегося вируса, тем самым нейтрализуя его нападение. Ученые адаптировали механизм CRISPR-Cas9 для редактирования генома, поскольку он представляет собой более точный, относительно дешевый и быстрый способ модификации генома.

1
Ученые идентифицируют участок ДНК, который они хотят модифицировать.



2
Затем они создают генетическую последовательность, так называемую РНК-проводник, которая соответствует целевому участку ДНК, и связывают РНК-проводник с ферментом Cas9, который действует как «молекулярные ножницы».



3
РНК-проводник определяет местонахождение целевого участка и дает указания Cas9 о том, где именно следует произвести разрез.

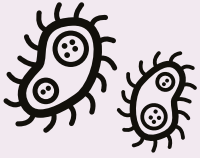


4
В этом месте может быть вставлен новый фрагмент ДНК, заменяющий вырезанный участок.



Синтетическая биология

Прикладные технологии, обеспечивающие экологическую устойчивость



Достижения синтетической биологии используются во многих отраслях: различные виды микроорганизмов — от бактерий до дрожжей — генетически реконструируются, чтобы стать крошечными фабриками, вырабатывающими более экологичные ингредиенты для лекарств, вакцин, биотоплива, экологически безопасных химикатов и новых материалов.

Лекарственные средства



Для производства **вакцины** против хламидий, которые становятся все более устойчивыми к обычным антибиотикам, модифицируется *E. coli*.



Экологичные химикаты и химические вещества, полученные из биологического сырья

Большое количество химических веществ, используемых в продуктах повседневного спроса, получены из нефти. Синтетическая биология позволяет производить вещества, которые могут заменить химикаты, получаемые из нефти.

Альтернативы химикатам, полученным из неэкологичных источников

Кровь меча является основным биомедицинским средством, используемым в фармацевтике для тестирования препаратов на бактериальное загрязнение. Ее биосинтетический заменитель может уменьшить потребность в промышленном ловле в океанах почти исчезнувшего вида или даже позволить полностью отказаться от этой практики.



Молочная кислота, янтарная кислота и пропандиол имеются в свободной продаже на мировом рынке и входят в число химических веществ, вырабатываемых генетически реконструированными микробами.

Методика геномного редактирования CRISPR-Cas9



Открытие CRISPR-Cas9 в корне изменило перспективы развития научных исследований в области синтетической биологии. Эта методика позволяет ученым вырезать определенный сегмент ДНК нужной последовательности или заменять его новой нитью ДНК. Такая точность редактирования необходима для проведения целого ряда медицинских исследований, что даст возможность совершить революцию в методах лечения.

Вместе с тем эта методика стала объектом пристального внимания на предмет ее безопасности, поскольку в результате непреднамеренного вырезания ДНК с последовательностью, аналогичной целевой нити, существует возможность того, что будут затронуты участки за пределами мишени, а это может вызвать злокачественное перерождение отредактированных клеток.

Рынок и инвестиции

13,9 млрд долл. США

Прогнозируемая глобальная рыночная стоимость прикладных биосинтетических технологий в 2022 году



1,9 млрд долл. США

2018 год
Глобальные инвестиции в создание новых компаний в области синтетической биологии



Биология «сделай сам» или «любительская биология»

Движение так называемых «гражданских ученых», заинтересованных в проведении экспериментов по синтетической биологии, получило значительное распространение во всем мире. Биологи-энтузиасты, многие из которых не имеют никакого опыта научной работы, собираются вместе в домашних лабораториях, оборудованных в гаражах, для проведения экспериментов с использованием специализированных наборов «Сделай сам» и простых протоколов, которые можно найти в интернете.

Отдельные члены этой группы располагают специализированным оборудованием и нанимают профессиональный персонал, чтобы оказать помощь гражданским ученым, биохакерам и биологам-энтузиастам в реализации их проектов.

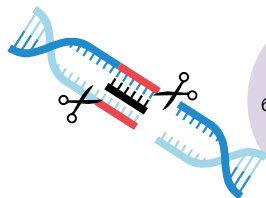
Риски и политические соображения

Существует обеспокоенность в отношении того, что синтетическая биология может быть использована для генно-инженерного реконструирования существующих болезнетворных вирусов, что приведет к повышению уровня их опасности, или для производства биохимикатов при наличии весьма скромных ресурсов и организационных возможностей.

Синтетическая биология создает новые проблемы, требующие своего решения на основе совместных действий государственных органов и международных организаций. Разработка более эффективных методов управления возникающими рисками имеет крайне важное значение с точки зрения обеспечения технической безопасности.

Прикладные технологии в области охраны окружающей среды и здравоохранения

Генные драйвы на основе CRISPR могут стать ключом к решению ряда глобальных проблем, таких как борьба с трансмиссивными болезнями или инвазивными видами, но их способность модифицировать, подавлять или вытеснять всю популяцию вида-мишени в обход фундаментальных принципов эволюции является вопросом, по которому требуется проведение широкой общественной дискуссии.



Применение генных драйвов стало возможным благодаря развитию технологии CRISPR-Cas9.



Американские каштаны близки к исчезновению по причине эндотиевого рака коры — грибкового заболевания, занесенного из Азии. При условии получения одобрения со стороны регулирующих органов, американский каштан может быть видоизменен таким образом, чтобы обрести устойчивость к эндотиюзу и начать распространяться в дикой природе.

Генные драйвы, созданные с целью подавления определенных признаков, могут привести к принудительному наследованию губительных генетических изменений, таких как стерильность, потенциально сводя популяцию-мишень к нулю. Драйв подавления предназначен для борьбы с популяциями комаров-переносчиков малярии в естественной среде.



Высвобождение в окружающую среду нескольких организмов-носителей генного драйва может трансформировать всю популяцию того или иного биологического вида, а потенциально — всю экосистему.

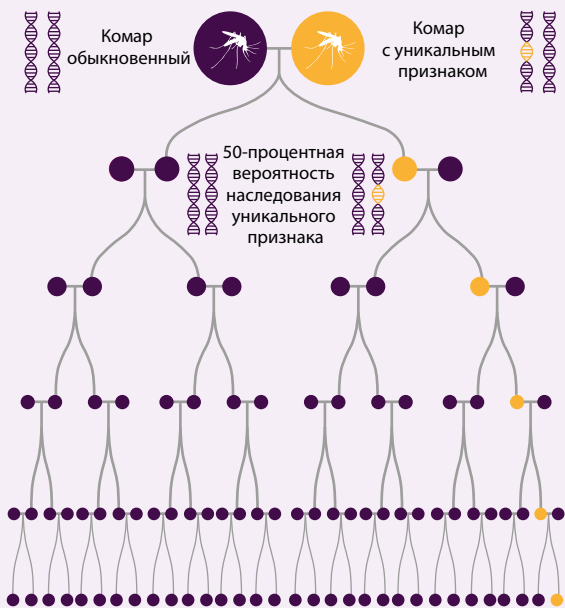


Межвидовое перекрестное генетическое загрязнение и непреднамеренный экологический ущерб являются лишь некоторыми из вполне обоснованных, но пока что не устраненных факторов обеспокоенности.

Генные драйвы на основе CRISPR: манипулирование популяциями растений и животных в дикой природе

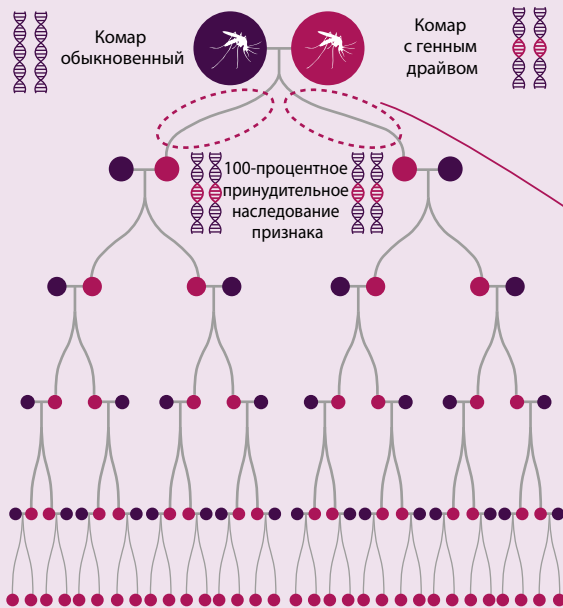
Обычный тип наследования

При половом размножении каждый родитель передает своему потомству половину своей ДНК. Уникальная генетическая особенность родителя может быть унаследованной следующим поколением с вероятностью 50%. Уникальный генотип сохраняется в популяции на протяжении жизни многих поколений, но регулярность его появления является низкой. Обычный тип наследования также относится к потомству, произведенному обычным родителем и классическим ГМО-родителем.



Наследование под воздействием генного драйва

Синтетический генный драйв позволяет обойти обычный порядок наследования генов. Этот самовоспроизводящийся механизм призван обеспечить будущим поколениям преимущественное наследование модифицированного генетического признака. Со временем вся популяция наследует предпочтительный генно-инженерный признак.



Во время оплодотворения потомство наследует один набор ДНК от обычного родителя и другой набор ДНК с генным драйвом на основе CRISPR от генно-инженерного родителя. CRISPR-Cas9 ищет участок-мишень в обычной ДНК и разрезает его.

Когда разрезанная ДНК пытается устранить повреждение, она копирует специально сконструированную нить, содержащую генный драйв.

В итоге потомство получает две копии генно-инженерной ДНК с генным драйвом, способным передаваться будущим поколениям.

Новое использование прикладных технологий: от лаборатории к экосистеме

Синтетическая биология может косвенно способствовать природоохранным усилиям, позволяя разрабатывать искусственные альтернативы реализуемой на рынке продукции, обычно производимой из естественных компонентов. Например, кровь мечехвоста является основным биомедицинским средством, используемым в фармацевтике для тестирования препаратов на бактериальное загрязнение. Истощительный промысел ведет к исчезновению этого вида по всему миру.³³ Был разработан синтетический заменитель, который мог бы уменьшить потребность в промышленном лове этого краба, находящегося под угрозой исчезновения.^{34,35} Аналогичным образом генно-инженерные микробы и микроводоросли, способные вырабатывать альтернативы маслам, содержащим жирные кислоты «омега-3», могут ослабить нагрузку на сокращающиеся запасы рыбы в дикой природе.³⁶

В последнее время появились природоохранные меры, которые предполагают более непосредственное применение технологических достижений в отношении целевых видов. Высвобождение генетически модифицированных организмов в окружающую среду может восстановить здоровье или повысить жизнестойкость пострадавших популяций. Например, используя подход, который предшествовал CRISPR, ученые синтезировали ген оксидата оксидазы, обычно экспрессируемый пшеницей, и обеспечили его экспрессию в американском каштане. Этот ген способен нейтрализовать токсин, выделяемый грибом-возбудителем, который привел к фактическому исчезновению этого вида деревьев.^{37,38} При условии получения одобрения со стороны регулирующих органов, американские каштаны, устойчивые к эндотиозу, могут быть высажены в природе, с тем чтобы восстановить этот некогда доминантный вид в лесах на востоке США. В отличие от генетически модифицированных сельскохозяйственных культур, в отношении которых обеспокоенность с точки зрения безопасности в основном сосредоточена на вопросах предотвращения их бесконтрольного распространения, генно-инженерный американский каштан как раз и создан для того, чтобы он мог распространяться и быть широко представлен в более широкой окружающей среде.

Поскольку, согласно прогнозам, изменение климата приведет к нарастанию темпов исчезновения биологических видов во всем мире, наличие метода CRISPR, вероятно, ускорит его прикладное применение в целях восстановления экосистем.³⁹ Ученые предлагают использовать CRISPR для сохранения таких находящихся под угрозой исчезновения видов, как кораллы, которые испытывают колоссальную нагрузку по причине повышения температуры, закисления и загрязнения океана. В настоящее время ведутся исследования по концептуальному обоснованию возможности применения метода CRISPR в целях переписывания генома кораллов для обеспечения экспрессии мутаций, способствующих повышению их жизнестойкости.^{40,41} Однако рамочные основы проведения этих исследований в полевых условиях все еще предстоит разработать.

▶ Видеоматериал:
Генетически модифицированные комары



Фотография предоставлена: Ajintai / Shutterstock.com

© biointeractive

Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=z1STGkDyEfM>

Стратегии, основанные на CRISPR, могут также обеспечить удаление инвазивных видов из находящихся под угрозой экосистем. Например, на многих тихоокеанских островах инвазивные грызуны уничтожают местные популяции птиц.⁴² Посредством международного сотрудничества в рамках программы генетического биоконтроля инвазивных грызунов разрабатываются генные драйвы на основе CRISPR, которые будут распространять признак стерильности.^{43,44} Полагают, что в Новой Зеландии генные драйвы на основе CRISPR помогут добиться ликвидации всех инвазивных хищников к 2050 году.⁴⁵ На Гавайях было предложено использовать генные драйвы для сокращения масштабов передачи домашними комарами птичьей малярии, которая привела к серьезному уменьшению популяций редких птиц.^{46,47} Тем не менее недавние исследования живучести и резистентности к тому, что генные драйвы могут столкнуться с резистентностью, и их эффективность в популяциях диких комаров будет ограниченной.^{48,49}

Было даже высказано предположение, что исчезнувшие биологические виды могут быть воссозданы по причине их экологической пользы. Например, шерстистое мамонтоподобное животное может быть возрождено методами геномной инженерии путем редактирования ДНК его ближайшего живущего в наши дни родственника — азиатского слона.^{50,51} Предложения о воссоздании исчезнувших видов не только являются весьма спорными, но и вновь подчеркивают важность устранения первопричины их исчезновения. Такие возможные генетические вмешательства, даже если они останутся нереализованными, становятся поводом для всестороннего обсуждения вопроса о том, каким образом биотехнология может способствовать достижению конечных целей природоохранной деятельности, сосуществовать параллельно с ними или оказывать на них негативное воздействие.⁵²



Воссоздание исчезнувших видов

На сегодняшний день попытки воссоздать недавно исчезнувшие или близкие к исчезновению биологические виды предпринимались путем использования методов обратной селекции и клонирования.⁵⁸⁻⁶⁰ Эти подходы зависят от наличия тканей вымерших животных, которых планируется клонировать, и существующих видов, которые подходят для скрещивания или могут использоваться в качестве суррогатных родителей.^{61,62} Ни одна из попыток воссоздания вымерших видов животных, предпринятых до настоящего времени, успехом не увенчалась. Возможность возвращения тех видов, которые давно исчезли с лица нашей планеты, оставив лишь небольшой след в виде своей ДНК, представляется крайне маловероятной. Это потребует реконструкции всего генома и существования близкородственного вида для жизнеспособного суррогатного материнства. Даже если технические трудности будут со временем преодолены, остаются значительные проблемы, связанные со способностью воссозданного вида функционировать в современной окружающей среде. К фундаментальным экологическим проблемам, вызывающим беспокойство, относятся: неопределенность в отношении межвидовой конкуренции и взаимодействия; предрасположенность воссозданных видов к болезням и их способность противостоять паразитам; возможность того, что они сами станут переносчиками болезней или превратятся в инвазивные виды; и возможность создания и сохранения здоровой популяции из особей с низким уровнем генетического разнообразия.⁶¹



Видеоматериал: Почему кровь мечехвоста стоит так дорого?



Фотография предоставлена: Lysogor Roman/ Shutterstock.com

© Business Insider

Видеоматериал доступен по адресу:

<https://www.youtube.com/watch?v=LgQZWSILBnA>

В целях уменьшения глобального бремени болезней целый ряд стратегий, основанных на применении синтетической биологии, предусматривает прямое подавление популяций переносчиков болезней. Компания под названием «Окситек» недавно вывела генно-инженерных комаров, экспрессирующих синтетический смертоносный ген, и выпустила их в окружающую среду в Южной Америке, Юго-Восточной Азии и нескольких странах Карибского бассейна с целью подавления переносчика лихорадки Денге, вируса Зика, желтой лихорадки и лихорадки чикунгунья.^{53,54} Эти так называемые «самоограничивающиеся» комары передают смертельный ген своему потомству, не давая ему дожить до половозрелого состояния. Однако без непрерывного выпуска генно-инженерных комаров в дикую природу для поддержания их популяции этот метод подавления остается обратимым. Чтобы обойти эту проблему, международный консорциум «Малярия под прицелом», финансируемый Фондом Билла и Мелинды Гейтс, разрабатывает генные драйвы на основе CRISPR для того, чтобы поставить переносчика малярии в Африке к югу от Сахары под постоянный контроль.⁵⁵ Генные драйвы на основе CRISPR являются высокоинвазивными, поскольку в теории одностороннее высвобождение в окружающую среду нескольких организмов-носителей генного драйва может полностью подавить всю дикую популяцию. Другая стратегия заключается в использовании генных драйвов, которые не подавляют популяцию, а вместо этого ограничивают способность комаров передавать болезнетворные микроорганизмы.⁵⁶ Генные драйвы на основе CRISPR были также разработаны для постоянной иммунизации белоногих хомячков против болезни Лайма на островах в штате Массачусетс, США.⁵⁷



Видеоматериал: Что такое «генный драйв»?



Обычный тип наследования

Наследование под воздействием генного драйва

Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=75iP50LEHrU>

© STAT

Инновации требуют проявления мудрости

Возможность случайного или преднамеренного высвобождения генно-инженерных организмов в окружающую среду вызывает обоснованную озабоченность в отношении поддержания биобезопасности и возникновения непредсказуемых последствий. В том, что касается организмов, создаваемых с помощью генной инженерии на закрытых исследовательских или промышленных объектах, процедуры их локализации и применяемые правила удаления отходов помогают избежать утечек, хотя нельзя полностью полагаться на то, что это никогда не случится.⁶³ В случае их преднамеренного высвобождения в окружающую среду причины для обеспокоенности в отношении возможного межвидового перекрестного генетического загрязнения, экологического взаимодействия и воздействия на экосистемы и экосистемные услуги остаются в значительной степени неустранимыми.⁶⁴ Генетическое видоизменение носителя заболевания потенциально может привести к эволюции безвредного микроорганизма и повышению его вирулентности или к тому, что его переносчиком станет другой организм.⁶⁵

На сегодняшний день генные драйвы на основе CRISPR испытывались только на малочисленных популяциях в контролируемых условиях, и в ходе одного из недавних лабораторных экспериментов вся популяция комаров-переносчиков малярии была успешно сведена на нет.⁶⁶ В качестве первого шага на пути к проведению более широких испытаний участники консорциума «Малярия под прицелом» недавно получили разрешение выпустить 10 000 модифицированных комаров в Буркина-Фасо. Эти пробные особи будут генетически реконструированы таким образом, чтобы быть стерильными, но не иметь генных драйвов, что позволит проверить, насколько хорошо они смогут конкурировать с самцами, живущими в дикой природе.⁶⁷ Однако такие полевые испытания, направленные на оценку эффективности системы генного драйва, могут создать определенные риски.^{68,69}

В силу необходимости придерживаться принципа предосторожности при разработке и использовании прикладных технологий и продуктов синтетической биологии, имеющих инновационный характер, следует проводить тщательную оценку рисков и учитывать различные точки зрения заинтересованных сторон.^{19,70,71} Принцип предосторожности гласит, что в тех случаях, когда деятельность человека может нанести неприемлемый вред, который с научной точки зрения является возможным, но вероятность такого исхода не определена, следует принимать меры для предотвращения или уменьшения такого вреда.⁷² В сочетании с принципом предосторожности нередко упоминается концепция существенной эквивалентности, согласно которой генетически модифицированный организм не менее безопасен, чем его предшественник.⁷³ В одних странах существует обширная политическая и нормативно-правовая база по вопросам генной инженерии и научных исследований, в то время как в других неработоспособные системы регулирования, пробелы в политике и отсутствие потенциала оценки рисков продолжают входить в число основных проблем, требующих своего решения.⁷⁴⁻⁷⁷

Предпринимаются попытки выявить, оценить и разрешить вызывающие обеспокоенность этические проблемы и факторы биобезопасности, связанные с синтетической биологией. В 2016 году Национальные академии наук, инженерного дела и медицины США опубликовали доклад о генных драйвах, в котором подчеркивается необходимость

проведения оценки экологических рисков на основе строгих критериев, а также организации обсуждений при самом активном участии широкой общественности, закрепляющих приоритет общечеловеческих ценностей.¹⁹

В декабре 2017 года специальная группа технических экспертов по вопросам синтетической биологии, учрежденная сторонами Конвенции о биологическом разнообразии, пришла к выводу о том, что организмы, разработанные или разрабатываемые с помощью современных методов синтетической биологии, включая те из них, которые содержат генные драйвы, подпадают под описание живых измененных организмов (ЖИО), обращение с которыми регулируется Картахенским протоколом, имеющим обязательную юридическую силу.⁷⁸ Этот Протокол, подписанный 171 страной-участницей, основан на принципе предосторожности и требует, чтобы каждая сторона приняла все необходимые меры для обеспечения безопасности при обращении с вновь созданными ЖИО, а также при их перевозке и использовании.⁷⁹

Исследовательский проект SYNBIOSAFE, финансируемый ЕС, был запущен в целях выявления ключевых вопросов, связанных с технической и физической безопасностью, этическими принципами управления рисками и, главное, взаимодействием между наукой и обществом, с выдвиганием на первый план задач просвещения общественности и налаживания диалога между учеными, деловыми кругами, правительством и специалистами по вопросам этики.^{80,81} Некоторые разработчики генных драйвов также предложили принять руководящие этические принципы научных исследований, в которых подчеркивается необходимость конструктивного взаимодействия с широкой общественностью.⁸² Тем не менее преднамеренное высвобождение модифицированных организмов в окружающую среду и заложенный в этом потенциал необратимой трансформации



Видеоматериал: Почему жители этой деревни в Африке не боятся комаров?



Фотография предоставлена: Dmitry Trashchenko
Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=ooYShrGkUQ>

© BBC News

▶ **Видеоматериал: Могут ли генно-инженерные хомячки сократить заболеваемость болезнью Лайма?**



Фотография предоставлена: Szasz-Fabian Jozsef / Shutterstock.com © PBS NewsHour
Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=FOCNixYPsf4>

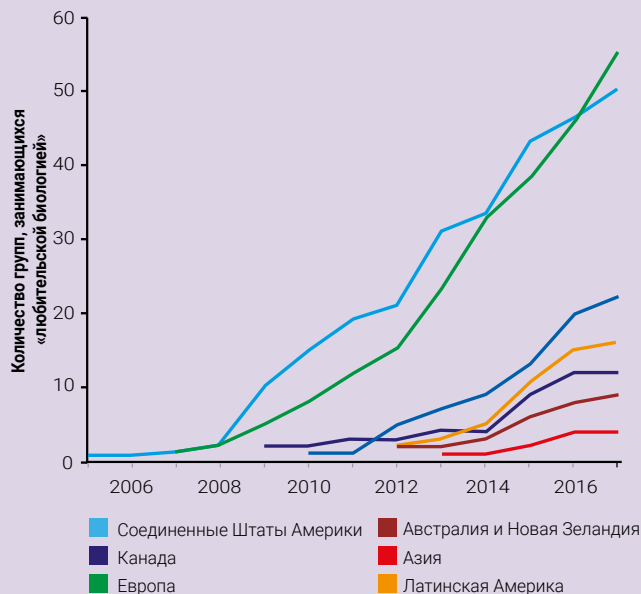
биологических видов, живущих в дикой природе, которые будут пересекать международные границы, скорее всего, станет проверкой действующих политических установок, в результате чего некоторые экологические группы будут призывать к объявлению моратория на все научные исследования в области генных драйвов.⁸³ Обеспокоенность в отношении нормативно-правового регулирования также связана с возможным использованием достижений синтетической биологии в военных наступательных целях.^{84,85}

Нынешние этические рамки, возможно, не поспевают за стремительным прогрессом в области синтетической биологии с присущей ей сложностью, особенно применительно к биологическим видам, живущим в дикой природе.⁸⁶ Решения о высвобождении генно-инженерных организмов в дикую природу будут формироваться в соответствии с экологической этикой, находящей все более широкое распространение, или тем, как большинство граждан относится к дикой природе, не затронутой деятельностью человека.⁸⁷ Изменение генетического кода объектов дикой природы рассматривается некоторыми как грубое нарушение установленных границ со стороны человека, подтверждающая наличие обеспокоенности в отношении генетически модифицированных сельскохозяйственных культур. Существует также мнение о том, что мы несем моральную ответственность и обязаны использовать любые технологии, которые могут спасти жизни людей или восстановить поврежденные экосистемы.⁸⁷ Наличие этих противоположных систем ценностей требует ответственного принятия решений, направленных на их регулирование.⁸⁹ В связи с применением достижений синтетической биологии на практике также возникает вопрос о том, кому именно принадлежит право собственности на тот или иной ЖИО и его геном, какие средства защиты доступны для уязвимых общин и как обеспечить, чтобы наиболее затронутые группы населения имели возможность выразить свое мнение. Крайне важно обеспечить, чтобы вопрос о векторе развития синтетической биологии задавался на дискуссионных форумах с широким представительством, а ее экологически значимые прикладные технологии использовались на благо всех, кто живет на нашей общей планете.



Гражданские ученые, биохакеры и «гаражные» лаборатории

Синтетическая биология и редактирование генома вызвали интерес не только у компаний, но и у обычных граждан. За последнее десятилетие биологические исследования в категории «сделай сам», также известные под названием «любительская биология» или движение «гражданских ученых», заинтересованных в проведении экспериментов в области синтетической биологии, стали явлением международного масштаба. Нередко обладая лишь небольшими предварительными знаниями в этой области, энтузиасты встречаются в импровизированных лабораториях, чтобы пройти ускоренный цикл подготовки в области биотехнологий и самостоятельно провести практические эксперименты.^{90,91} Простые протоколы, найденные в Интернете, и специализированные наборы стоимостью 150–1 600 долларов США привели к быстрому расширению этого движения. Биолaborатории «Сделай сам» можно встретить в большинстве крупных городов, и к 2017 году по всему миру было образовано примерно 168 групп таких исследователей.^{92,93} Регулирование использования легкодоступных и недорогих технологий, таких как CRISPR и комплекты для редактирования генов, вероятно, станут одной из проблем, требующих своего решения со стороны органов власти. Помимо этого, нарастает обеспокоенность в связи с тем, что эта технология может быть использована террористами для уничтожения сельскохозяйственных культур или превращения безвредных микробов в биологическое оружие.⁹⁴



Источник: The Brookings Institute⁹³

Список использованной литературы

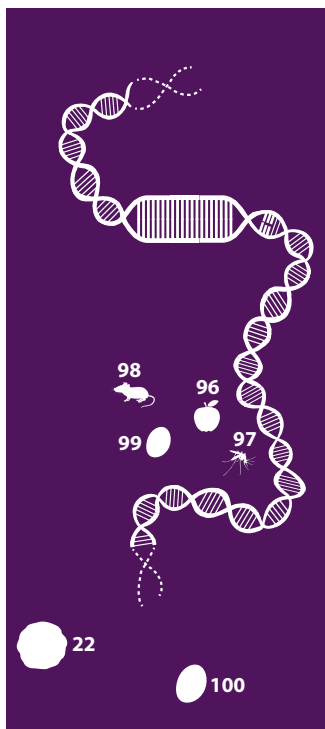
- International Union for Conservation of Nature (2018). The IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org/>
- World Health Organization (2017). *Global vector control response 2017-2030*. Geneva. <http://www.who.int/vector-control/publications/global-control-response/en/>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., et al. (2016). The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354(6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>
- Heo, M.J., Jung, H.M., Um, J., Lee, S.W. and Oh, M.K. (2017). Controlling citrate synthase expression by CRISPR/Cas9 genome editing for n-butanol production in *Escherichia coli*. *ACS Synthetic Biology* 6(2), 182-189. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.6b00134>
- Raj, K., Partow, S., Correia, K., Khusnutdinova, A.N., Yakunin, A.F. and Mahadevan, R. (2018). Biocatalytic production of adipic acid from glucose using engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering Communications* 6, 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.meten.2018.02.001>
- Averesch, N.J.H., Martínez, V.S., Nielsen, L.K. and Krömer, J.O. (2018). Toward synthetic biology strategies for adipic acid production: An *in silico* tool for combined thermodynamics and stoichiometric analysis of metabolic networks. *ACS Synthetic Biology* 7(2), 490-509. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.7b00304>
- Peplow, M. (2016). Synthetic biology's first malaria drug meets market resistance. *Nature News*, 23 February. Doi: 10.1038/530390a. <https://www.nature.com/news/synthetic-biology-s-first-malaria-drug-meets-market-resistance-1.19426>
- Kelley, N.J., Whelan, D.J., Kerr, E., Apel, A., Beliveau, R. and Scanlon, R. (2014). Engineering biology to address global problems: Synthetic biology markets, needs, and applications. *Industrial Biotechnology* 10, 140-149. <https://www.liebertpub.com/doi/pdf/10.1089/ind.2014.1515>
- McEachran, R. (2015). Creators defend vanilla flavour made using synthetic biology. *The Guardian*, 28 May 2015. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/may/28/creators-defend-vanilla-flavour-made-using-synthetic-biology>
- Bhanawase, S.L. and Yadav, G.D. (2017). Novel silica-encapsulated Cu-Al hydrotalcite catalyst: oxidative decarboxylation of vanillyl mandelic acid to vanillin in water at atmospheric pressure. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 56(45), 12899-12908. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b04982>
- Purcell, B.P., Williamson, D.T., Marga, F.S., Shofer, S.J. and Cassingham, D.M. (2016). Method for making a biofabricated material containing collagen fibrils. International Patent Application No. PCT/US2017/017889, filed 15 February 2017. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017142896&tab=PCTBIBLIO&maxRec=1000>
- Amyris (2018). *Amyris Aprinnova joint venture launches pharmaceutical grade Neosance Squalane USP — opens new market among FDA regulated products*. 8 February. <http://investors.amyris.com/news-releases/news-release-details/amyris-aprinnova-joint-venture-launches-pharmaceutical-grade>
- Le Feuvre, R.A. and Scrutton, N.S. (2018). A living foundry for synthetic biological materials: a synthetic biology roadmap to new advanced materials. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 3, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2018.04.002>
- Barrangou, R. and Doudna, J.A. (2016). Applications of CRISPR technologies in research and beyond. *Nat Biotechnol* 34, 933-941. <https://doi.org/10.1038/nbt.3659>
- Piaggio, A.J., Segelbacher, G., Seddon, P.J., Alphey, L., Bennett, E.L., Carlson, R.H. et al. (2017). Is it time for synthetic biodiversity conservation? *Trends in Ecology & Evolution* 32, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.016>
- Redford, K.H., Adams, W., Carlson, R., Mace, G.M. and Ceccarelli, B. (2014). Synthetic biology and the conservation of biodiversity. *Oryx* 48, 330-336. <https://doi.org/10.1017/S0030605314000040>
- Esvelt, K.M. and Gemmill, N.J. (2017). Conservation demands safe gene drive. *PLOS Biology* 15, e2003850. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003850>
- Nuffield Council on Bioethics (2012). *Emerging biotechnologies: technology, choice and the public good*. London. http://nuffieldbioethics.org/wp-content/uploads/2014/07/Emerging_biotechnologies_full_report_web_0.pdf
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016). *Gene drives on the horizon: Advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values*. Washington DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23405>
- Convention on Biological Diversity (2016). Decision adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity XIII/17 Synthetic biology. 16 December. CBD/COP/DEC/XIII/17. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-13/cop-13-dec-17-en.pdf>
- Cohen, S.N., Chang, A.C.Y., Boyer, H.W. and Helling, R.B. (1973) *Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 70, 3240-3244
- Gibson, D.G., Glass, J.I., Lartigue, C., Noskov, V.N., Chuang, R.Y., Algire, M.A. et al. (2010). Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329(5987), 52-56. Doi: 10.1126/science.1190719. <http://science.sciencemag.org/content/329/5987/52>
- Sternberg, S.H. and Doudna, J.A. (2015). Expanding the biologist's toolkit with CRISPR-Cas9. *Molecular Cell* 58(4), 568-574. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2015.02.032>
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J.A. and Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337(6096), 816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Kim, Y.G., Cha, J. and Chandrasegaran, S. (1996). *Hybrid restriction enzymes: zinc finger fusions to Fok I cleavage domain*. Proceedings of the National Academy of Sciences 93, 1156-1160. <http://www.pnas.org/content/93/3/1156>
- Wei, C., Liu, J., Yu, Z., Zhang, B., Gao, G. and Jiao, R. (2013). TALEN or Cas9 - rapid, efficient and specific choices for genomic modifications. *Journal of Genetics and Genomics* 40, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2013.03.013>
- Horvath, P. and Barrangou, R. (2010). CRISPR/Cas, the immune system of bacteria and archaea. *Science* 327(5962), 167-170. <https://doi.org/10.1126/science.1179555>
- Rath, D., Amlinger, L., Rath, A. and Lundgren, M. (2015). The CRISPR-Cas immune system: Biology, mechanisms and applications. *Biochimie* 117, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025>

29. Hsu, P.D., Lander, E.S. and Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell* 157(6), 1262-1278. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.010>
30. Cox, D.B.T., Gootenberg, J.S., Abudayyeh, O.O., Franklin, B., Kellner, M.J., Joung, J. et al. (2017). RNA editing with CRISPR-Cas13. *Science* 358(6366), 1019-1027. <https://doi.org/10.1126/science.aqa0180>
31. Esvelt, K.M., Smidler, A.L., Catteruccia, F. and Church, G.M. (2014). Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. *eLife* 3, e03401. <https://doi.org/10.7554/eLife.03401>
32. Champer, J., Buchman, A. and Akbari, O.S. (2016). Cheating evolution: engineering gene drives to manipulate the fate of wild populations. *Nature Reviews Genetics* 17(3), 146-159. <https://doi.org/10.1038/nrg.2015.34>
33. Smith, D.R., Brockmann, H.J., Beekey, M.A., King, T.L., Millard, M.J. and Zaldivar-Rae, J. (2017). Conservation status of the American horseshoe crab (*Limulus polyphemus*): a regional assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 27(1), 135-175. <https://doi.org/10.1007/s11160-016-9461-y>
34. Ding, J.L. and Ho, B. (2010). Endotoxin detection - from *Limulus* amoebocyte lysate to recombinant factor C. *Subcell Biochem* 53, 187-208. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9078-2_9
35. Zhang, S. (2018). *The last days of the blue-blood harvest*. The Atlantic, May 9. <https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/05/blood-in-the-water/559229/>
36. Sprague, M., Betancor, M.B. and Tocher, D.R. (2017). Microbial and genetically engineered oils as replacements for fish oil in aquaculture feeds. *Biotechnology Letters* 39(11), 1599-1609. <https://doi.org/10.1007/s10529-017-2402-6>
37. Newhouse, A.E., Polin-McGuigan, L.D., Baier, K.A., Valletta, K.E.R., Rottmann, W.H., Tschaplinski, T.J. et al. (2014). Transgenic American chestnuts show enhanced blight resistance and transmit the trait to T1 progeny. *Plant Science* 228, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.004>
38. Steiner, K.C., Westbrook, J.W., Hebard, F.V., Georgi, L.L., Powell, W.A. and Fitzsimmons, S.F. (2017). Rescue of American chestnut with extraspecific genes following its destruction by a naturalized pathogen. *New Forests* 48, 317-336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016894521400079X>
39. Urban, M.C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348, 571-573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
40. Van Oppen, M.J.H., Oliver, J.K., Putnam, H.M. and Gates, R.D. (2015). *Building coral reef resilience through assisted evolution*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 2307-2313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422301112>
41. Cleves, P.A., Strader, M.E., Bay, L.K., Pringle, J.R. and Matz, M.V. (2018). *CRISPR/Cas9-mediated genome editing in a reef-building coral*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722151115>
42. Harper, G.A. and Bunbury, N. (2015). Invasive rats on tropical islands: Their population biology and impacts on native species. *Global Ecology and Conservation*, 3, 607-6027. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.010>
43. Leitschuh, C.M., Kanavy, D., Backus, G.A., Valdez, R.X., Serr, M., Pitts, E.A. et al. (2018). Developing gene drive technologies to eradicate invasive rodents from islands. *Journal of Responsible Innovation* 5, 121-138. <https://doi.org/10.1080/232299460.2017.1365232>
44. The Genetic Biocontrol of Invasive Rodents (2018). GBIRD program. <http://www.geneticbiocontrol.org>
45. Predator free New Zealand (2018). Predator free NZ. <https://predatorfree.nz.org>
46. Paxton, E.H., Camp, R.J., Gorresen, P.M., Crampton, L.H., Leonard, D.L. Jr. and VanderWerf, E.A. (2016). Collapsing avian community on a Hawaiian island. *Science Advances* 2(9), e1600029. <http://advances.sciencemag.org/content/2/9/e1600029>
47. Regalado, A. (2016). The plan to rescue Hawaii's birds with genetic engineering. *MIT Technology Review*, 11 May. <https://www.technologyreview.com/s/601383/the-plan-to-rescue-hawaiis-birds-with-genetic-engineering/>
48. Hammond, A.M., Kyrou, K., Bruttini, M., North, A., Galizi, R., Karlsson, X. et al. (2017). The creation and selection of mutations resistant to a gene drive over multiple generations in the malaria mosquito. *PLoS Genet* 13(10), e1007039. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007039>
49. Shaw, W.R. and Catteruccia, F. (2018). Vector biology meets disease control: using basic research to fight vector-borne diseases. *Nature Microbiology*. <https://doi.org/10.1038/s41564-018-0214-7>
50. Zimov, S.A., Zimov, N.S., Tikhonov, A.N. and Chapin, F.S. (2012). Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon. *Quaternary Science Reviews* 57, 26-45. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.005>
51. Shapiro, B. (2015). Mammoth 2.0: will genome engineering resurrect extinct species? *Genome Biology* 16, 228. <https://doi.org/10.1186/s13059-015-0800-4>
52. Kaebnick, G.E. and Jennings, G. (2017). De-extinction and conservation. *Hastings Center Report* 47(4), S2-S3. <https://doi.org/10.1002/hast.744>
53. Phuc, H.K., Andreasen, M.H., Burton, R.S., Vass, C., Epton, M.J., Pape, G. et al. (2007). Late-acting dominant lethal genetic systems and mosquito control. *BMC Biol* 5, 11. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-5-11>
54. Harris, A.F., McKemey, A.R., Nimmo, D., Curtis, Z., Black, I., Morgan, S.A. et al. (2012). Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes. *Nat Biotechnol* 30, 828-830. <https://doi.org/10.1038/nbt.2350>
55. Target Malaria (2017). Our work. <http://targetmalaria.org/our-work/>
56. Hoffmann, A.A., Montgomery, B.L., Popovici, J., Iturbe-Ormaetxe, I., Johnson, P.H., Muzzi, F. et al. (2011). Successful establishment of *Wolbachia* in *Aedes* populations to suppress dengue transmission. *Nature* 476, 454-457. <https://doi.org/10.1038/nature10356>
57. MIT Media Lab (2017). Preventing tick-borne disease by permanently immunizing mice. <https://www.media.mit.edu/projects/preventing-tick-borne-disease-by-permanently-immunizing-mice/overview/>
58. Folch, J., Cocero, M.J., Chesné, P., Alabart, J.L., Domínguez, V., Cogliani, Y. et al. (2009). First birth of an animal from an extinct subspecies (*Capra pyrenaica pyrenaica*) by cloning. *Theriogenology*, 71(6), 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.11.005>
59. Shapiro, B. (2016). Pathways to de-extinction: how close can we get to resurrection of an extinct species? *Functional Ecology*. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.12705>
60. Stokstad, E. (2015). Bringing back the aurochs. *Science*, 350, 1144-1147. <https://doi.org/10.1126/science.350.6265.1144>
61. Richmond, D.J., Sinding, M.H.S. and Gilbert, M.T.P. (2016). The potential and pitfalls of de-extinction. *Zoologica Scripta*, 45, 22-36. <https://doi.org/10.1111/zsc.12212>

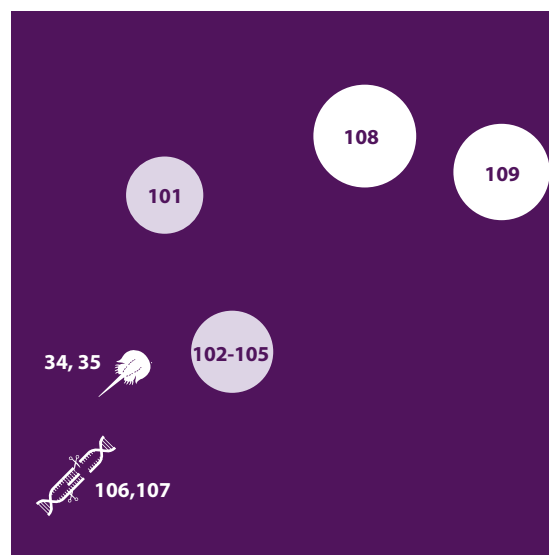
62. Sherkow, J.S. and Greely, H.T. (2013). What if extinction is not forever? *Science* 340(6128), 32-33. <https://doi.org/10.1126/science.1236965>
63. Moe-Behrens, G.H.G., Davis, R. and Haynes, K.A. (2013). Preparing synthetic biology for the world. *Front Microbiol* 4, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00005>
64. Hayes, K.R., Hosack, G.R., Dana, G.V., Foster, S.D., Ford, J.H., Thresher, R. et al. (2018). Identifying and detecting potentially adverse ecological outcomes associated with the release of gene-drive modified organisms. *Journal of Responsible Innovation* 5(S1), S139–S158. <https://doi.org/10.1080/23299460.2017.1415585>
65. David, A.S., Kaser, J.M., Morey, A.C., Roth, A.M. and Andow, D.A. (2013). Release of genetically engineered insects: a framework to identify potential ecological effects. *Ecology and Evolution* 3(11), 4000–4015. <https://doi.org/10.1002/ece3.737>
66. Kyrou, K., Hammond, A.M., Galizi, R., Kranjc, N., Burt, A., Beaghton, A.K. et al. (2018). A CRISPR–Cas9 gene drive targeting doublesex causes complete population suppression in caged *Anopheles gambiae* mosquitoes. *Nature Biotechnology*, 36, 1062–1066. <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.4245>
67. Alliance for Science (2018). African scientists confident GMO mosquitoes will be game changer in fight to control malaria, September 13. <https://alliancefor-science.cornell.edu/blog/2018/09/african-scientists-confident-gmo-mosquitoes-will-game-changer-fight-control-malaria/>
68. Akbari, O.S., Bellen, H.J., Bier, E., Bullock, S.L., Burt, A., Church, G.M. et al. (2015). Safeguarding gene drive experiments in the laboratory. *Science* 349(6251), 927. <https://doi.org/10.1126/science.aac7932>
69. James, S., Collins, F.H., Welkhoff, P.A., Emerson, C., Godfray, H.C.J., Gottlieb, M. et al. (2018). Pathway to deployment of gene drive mosquitoes as a potential biocontrol tool for elimination of malaria in sub-Saharan Africa: Recommendations of a Scientific Working Group. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 98(6_Suppl), 1–49. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.18-0083>
70. Kwok, R. (2010) Five hard truths for synthetic biology. *Nature* 463, 288–290. <https://doi.org/10.1038/463288a>
71. Kaebnick, G.E., Heitman, E., Collins, J.P., Delborne, J.A., Landis, W.G., Sawyer, K. et al. (2016) Precaution and governance of emerging technologies. *Science* 354, 710–711. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aah5125>
72. Kriebel, D., Tickner, J., Epstein, P., Lemons, J., Levins, R., Loechler, E.L. et al. (2001). The precautionary principle in environmental science. *Environmental Health Perspectives* 109, 871–876. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.01109871>
73. Organisation for Economic Co-operation and Development (1993) *Safety evaluation of foods derived by modern biotechnology: concepts and principles*. Paris: OECD.
74. Oye, K.A., Esvelt, K., Appleton, E., Catteruccia, F., Church, G., Kuiken, T. et al. (2014) Regulating gene drives. *Science* 345, 626–628. <https://doi.org/10.1126/science.1254287>
75. Douglas, C.M.W. and Stemerding, D. (2014) Challenges for the European governance of synthetic biology for human health. *Life Sciences, Society and Policy* 10, 6. <https://doi.org/10.1186/s40504-014-0006-7>
76. Trump, B.D. (2017). Synthetic biology regulation and governance: Lessons from TAPIC for the United States, European Union, and Singapore. *Health Policy* 121, 1139–1146. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2017.07.010>
77. Glover, B., Akinbo, O., Savadogo, M., Timpo, S., Lemgo, G., Sinebo, W. et al. (2018). Strengthening regulatory capacity for gene drives in Africa: leveraging NEPAD's experience in establishing regulatory systems for medicines and GM crops in Africa. *BMC Proc.* 12(8). <https://doi.org/10.1186/s12919-018-0108-y>
78. Convention on Biological Diversity (2017). *Report of the ad hoc technical expert group on synthetic biology*. Montreal, Canada, 5–8 December 2017. CBD/SYN-BIO/AHTEG/2017/1/3. <https://www.cbd.int/doc/c/aa10/9160/6c3fcded265d-bee686715016/synbio-ahteg-2017-01-03-en.pdf>
79. Convention on Biological Diversity (2018). The Cartagena Protocol on Biosafety. Convention on Biological Diversity, Montreal. <http://bch.cbd.int/protocol>
80. Schmidt, M., Torgesen, H., Ganguli-Mitra, A., Kelle, A., Deplazes, A. and Biller-Andorno, N. (2008). SYNBIOSAFE e-conference: online community discussion on the societal aspects of synthetic biology. *Systems and Synthetic Biology* 2, 7–17. <https://doi.org/10.1007/s11693-008-9019-y>
81. Schmidt, M., Kelle, A., Ganguli-Mitra, A. and de Vriend, H. (2009). *Synthetic Biology: the technoscience and its societal consequences*. Springer, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2678-1>
82. Emerson, C., James, S., Littler, K. and Randazzo, F. (2017). Principles for gene drive research. *Science*, 358, 1135–1136. <https://doi.org/10.1126/science.aap9026>
83. ETC Group. (2016). Reckless driving: gene drives and the end of nature, 1 September. <http://www.etcgroup.org/content/reckless-driving-gene-drives-and-end-nature>
84. Callaway, E. (2017). US defence agencies grapple with gene drives. *Nature News*, 21 July. <https://doi.org/10.1038/nature.2017.22345>
85. Defense Advanced Research Projects Agency (2018). Safe Genes program, DARPA. <https://www.darpa.mil/program/safe-genes>
86. Kaebnick, G.E., Gusmano, M.K. and Murray, T.H. (2014). The ethics of synthetic biology: next steps and prior questions. *Hastings Center Report* 44, S4–S26. <https://doi.org/10.1002/hast.392>
87. Batavia, C. and Nelson, M.P. (2017). For goodness sake! What is intrinsic value and why should we care? *Biological Conservation* 209, 366–376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2017.03.003>
88. Kaebnick, G.E. (2017). The spectacular garden: where might de-extinction lead? *Hastings Center Report* 47, S60–S64. <https://doi.org/10.1002/hast.754>
89. Kofler, N., Collins, J.P., Kuzma, J., Marris, E., Esvelt, K., Nelson, M.P. et al. (2018). Editing nature: Local roots of global governance. *Science* 362(6414), 527–529. <https://doi.org/10.1126/science.aat4612>
90. Ledford, H. (2010). Garage biotech: Life hackers. *Nature* 467, 650–652. <https://doi.org/10.1038/467650a>
91. Regalado, A. (2017). One man's quest to hack his own genes. *MIT Technology Review*, January 10. <https://www.technologyreview.com/s/603217/one-mans-quest-to-hack-his-own-genes/>
92. Ochoa Cruz, E.A., de la Barrera Benavidez, O.J., Giménez, M., Chavez, M. and Van Sluys, M-A. (2016). The biohacking landscape in Latin America. *BioCoder* 10, 5–12. <https://www.oreilly.com/ideas/biohacking-latin-america>.
93. Kolodziejczyk, B. (2017). Do-it-yourself biology shows safety risks of an open innovation movement. Brookings Institution, October 9. <https://www.brookings.edu/blog/techtank/2017/10/09/do-it-yourself-biology-shows-safety-risks-of-an-open-innovation-movement>

94. United Nations (2018). Terrorists potentially target millions in makeshift biological weapons 'laboratories', UN forum hears. UN News, 17 August 2018. United Nations, New York. <https://news.un.org/en/story/2018/08/1017352>
95. National Human Genome Research Institute (NHGRI). (2002). International Team of Researchers Assembles Draft Sequence of Mouse Genome. <https://www.genome.gov/10002983/2002-release-draft-sequence-of-mouse-genome>

Список использованных графических материалов



96. Daccord, N., Celton, J., Linsmith, G., Becker, C., Choise, N., Schijlen, E., van de Geest, H., et al. (2017). High-quality *de novo* assembly of the apple genome and methylome dynamics of early fruit development. *Nature Genetics*, 49(7), 1099-1106. <https://doi.org/10.1038/ng.3886>
97. Holt, R.A., Subramanian, G.M., Halpern, A., Sutton, G.G., Charlab, R., Nusskern, D.R., Wincker, P., et al. (2002). The genome sequence of the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. *Science*, 298(5591), 129-149. <https://doi.org/10.1126/science.1076181>
98. Cooper, G. (2000). *The Cell: A Molecular Approach*. 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
99. Annaluru, N., Muller, H., Mitchell, L., Ramalingam, S., Stracquadanio, G., Richardson, S., Dymond, J., et al. (2014). Total Synthesis of a Functional Designer Eukaryotic Chromosome. *Science*, 344(6179), 55-58. <https://doi.org/10.1126/science.1249252>



100. SAVI (2019). Synthetic yeast 2.0. The Science Across Virtual Institutes program. <http://syntheticyeast.org>
101. He, W., Felderman, M., Evans, A., Geng, J., Homan, D., Bourguet, F., Fischer, N., et al. (2017). Cell-free production of a functional oligomeric form of a Chlamydia major outer-membrane protein (MOMP) for vaccine development. *Journal of Biological Chemistry*, 292(36), 15121-15132. <https://doi.org/10.1074/jbc.M117.784561>
102. Woodrow Wilson Center (2019). Synthetic biology project. <http://www.synbio-project.org/cpi/applications/>
103. Reverdia (2019). Biosuccinium® sustainable succinic acid. <https://reverdia.com/biosuccinium-menu/biosuccinium/>
104. GC Innovation America (2019). Biotechnology Research & Development. <https://www.gcinnovationamerica.com/biocatalyst-rd/>
105. DuPont Tate & Lyle Bio Products Company (2019). Susterra® Propanediol. <http://duponttateandlyle.com/susterra>
106. Ihry, R.J., Worringer, K.A., Salick, M.R., Frias, E., Ho, D., Theriault, K., Kommineni, S., et al. (2018). p53 inhibits CRISPR-Cas9 engineering in human pluripotent stem cells. *Nature Medicine*, 24, 939-946. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0050-6>
107. Haapaniemi, E., Botla, S., Persson, J., Schmierer, B. and Taipale, J. (2018). CRISPR-Cas9 genome editing induces a p53-mediated DNA damage response. *Nature Medicine*, 24, 927-930. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0049-z>
108. BCC Research (2018). Synthetic Biology Global Markets to Reach \$13.9 Billion by 2022. [https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-\\$139-billion-by-2022](https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-$139-billion-by-2022)
109. Cumbers, J. and Bünger, M. (2019). Synthetic Biology Annual Investment Report (2018) - SynBioBeta. SynBioBeta.com. <https://synbiobeta.com/synthetic-biology-industry-strategy-reports/investment-report-2018>



Фотография предоставлена: ALEX_UGALEK / Shutterstock

Экологическая связность: мост к сохранению биоразнообразия

Восстановление связности фрагментированных экосистем

Когда-то природа была огромной и безграничной, но в индустриальном мире XXI-го века это уже не так. Во всем мире наземные и морские ландшафты становятся все более фрагментированными. Представители дикой флоры и фауны обладают все меньшей свободой перемещения, а свободно текущие реки встречаются все реже. Вдоль тропических побережий, где ранее были сплошные мангровые заросли, а в океане — луга руппии и коралловые рифы, в настоящее время под воздействием природных и антропогенных факторов возникают раздробленные ландшафты, что подрывает основополагающую продуктивность и жизнестойкость экосистем.¹ Вследствие сегментации природных ландшафтов млекопитающие и другие биологические виды покрывают менее половины расстояний, которые они преодолевали ранее.² Ограничение способности диких животных мигрировать, рассеиваться, спариваться, кормиться и процветать означает, что они оказываются загнанными в угол в ситуациях, когда угроза их исчезновения нависает все сильнее.

Фрагментация обычно является симптомом трансформации и разрушения ландшафта. Разделение ареала обитания на фрагменты приводит к трем конкретным последствиям: уменьшению общей площади и качества среды обитания, нарастанию изолированности небольших участков среды обитания и усилению возмущений, связанных с искусственными границами фрагментов среды обитания, или «краевых эффектов».³⁻⁶ Изолированность и сокращение размера ареала означают, что на нем начинает обитать меньшее количество видов с меньшей численностью популяций, при этом происходит ограничение взаимодействия между участками ареала. Удлинение краев фрагментов подвергает популяции в пределах участка внешним возмущениям вдоль его границ. Со временем, когда участок становится слишком маленьким и изолированным, жизнеспособные популяции больше не могут сохранять свою устойчивость, от чего страдает видовое богатство.⁵ Фрагментация в конечном счете приводит к формированию нисходящей спирали каскадных экологических дисфункций, начиная с распада пищевых сетей и заканчивая утратой важнейших экологических процессов, таких как поступление потоков минеральных и питательных веществ, а также к прямому вымиранию видов.^{3,5,7-9}

Поддержание или восстановление связности фрагментированных ареалов обитания или участков ландшафта считается ключевым фактором противодействия многим негативным последствиям фрагментации.¹⁰ Связность можно определить как степень, в которой наземные и морские ландшафты позволяют биологическим видам свободно перемещаться, а экологическим процессам беспрепятственно функционировать. Научные данные, основанные на исследованиях островной биогеографии и метапопуляций видов, в подавляющем большинстве случаев свидетельствуют о том, что с точки зрения сохранения биологических видов и экологических функций взаимосвязанные ареалы обитания более эффективны.^{11,12} Взаимосвязанные экологические сообщества и ареалы обитания поддерживают жизненно важные экологические процессы, такие как опыление, продуктивность, разложение, биохимическая цикличность и круговорот питательных веществ. Экологическая связность может также помочь биологическим видам адаптироваться к будущим условиям и буферным изменениям окружающей среды посредством повышения экологической жизнестойкости перед лицом разрушительных природных явлений, таких как изменение климата.¹³

Несмотря на очевидные преимущества сохранения экологической связности, страны мира в настоящее время не имеют последовательного подхода в этом вопросе. Как лучше всего оценить степень успеха в деле сохранения связности? Что делают правительства и специалисты по охране окружающей среды для создания экологических коридоров, проектирования экологических сетей и определения эффективности усилий по сохранению связности? Сохранение нетронутых наземных и морских ландшафтов посредством выделения обширных охраняемых природных территорий и увеличения числа таких территорий целесообразно, но требует принятия трудных политических, социальных и экономических решений.^{14,15} Как целевая задача природоохранной деятельности поддержания связности требует совместного целеполагания с участием всех заинтересованных сторон, обеспечивающего углубленное рассмотрение всех аспектов этой проблемы, а также реализации скоординированных и практически осуществимых мер. Для достижения эффективных конечных результатов необходимо наладить сотрудничество между государственным и частным секторами. Предотвращение утраты биоразнообразия и уменьшение воздействия на экосистемы является общей ответственностью всех слоев общества на любом уровне — от уровня общин до международного масштаба. Во многих случаях в рамках более широкой природоохранной работы меры по обеспечению связности могут осуществляться с учетом существующих социально-экономических проблем на местах.



Видовое богатство, межвидовые взаимодействия и плотность популяции



Генетическая изменчивость и перенос генов



Перемещение и распространение



Риск появления зоонозных инфекций, вспышки заболеваемости и подверженность человека инфекционным заболеваниям



Фрагментация ареалов обитания

Около 40 процентов наземных экосистем преобразованы в сельскохозяйственные угодья.¹⁶ Видоизменение ландшафта и рек в целях их использования человеком приводит к фрагментации ареалов обитания. Меньшие по размеру и в большей степени изолированные фрагменты ареалов обитания, окруженные участками, на которых человек осуществляет свою деятельность, с меньшей вероятностью могут поддерживать сохранение среды обитания и способствовать выживанию животных и растений, населяющих данную местность. Фрагментация ареалов обитания отрицательно сказывается на численности, распределении, перемещении, богатстве биологических видов и взаимодействии между ними, их размножении и генетическом разнообразии.⁵ Это ослабляет способность биологических видов адаптироваться к новым климатическим условиям.¹⁷



Движущие силы фрагментации

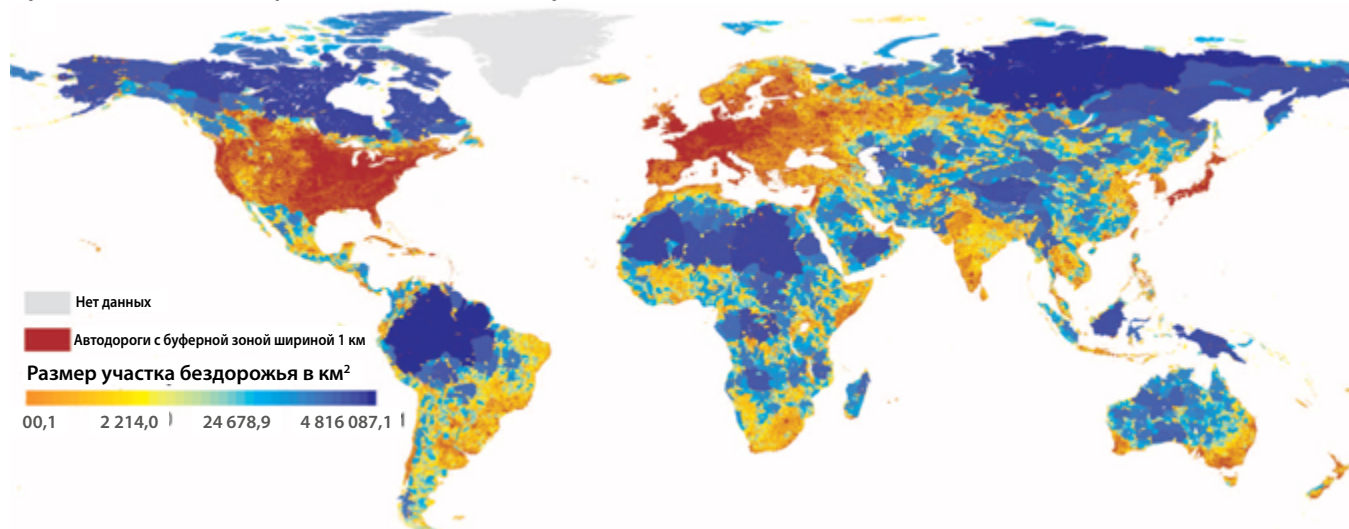
Под действием человеческого общества биосфера Земли трансформируется, а в окружающей среде происходят беспрецедентные изменения. Новейшие исследования свидетельствуют о том, что более 75 процентов поверхности суши нашей планеты было изменено человеком.¹⁸⁻²¹ В результате синергетического эффекта от роста численности населения, нарастающих темпов урбанизации, расширения сельскохозяйственных угодий, загрязнения окружающей среды и развития инфраструктуры происходит дальнейшая фрагментация экосистем. Согласно некоторым прогнозным моделям землепользования к 2050 году специально под сельскохозяйственных нужды может быть расчищено около одного миллиарда гектаров тропических земель.²² Морская среда в еще большей степени подвержена воздействию этих тенденций: новые исследования показывают, что лишь около 13 процентов Мирового океана по-прежнему относятся к категории девственных морей, что намного меньше, чем ожидали многие защитники природы.²³

Основная нагрузка в ходе современного развития нередко создается линейной инфраструктурой. Автомобильные дороги, рельсы, трубопроводы, ограждения и каналы строятся рекордными темпами, особенно в отдаленных, ранее неосвоенных районах тропиков. Ожидается, что 90 процентов всего нового дорожного строительства будет осуществляться в развивающихся

странах.²⁴ В Индии, где обитает почти 60 процентов популяции тигра в мире, критически важным коридорам перемещения тигров угрожают 4 300 километров вновь запланированных общенациональных автомагистралей и автомобильных дорог между штатами.²⁵ В глобальном масштабе к 2050 году ожидается завершение строительства более 25 миллионов километров новых автомобильных дорог, что увеличит общую протяженность существующих автодорог по сравнению с 2010 годом на 60 процентов.²⁶

Свободно текущие реки, источник экологической жизненной силы ландшафтов и эстуариев, подвергаются фрагментации, обусловленной размерами плотин и масштабами их продолжающегося строительства. Крупные плотины разделяют 59 процентов рек мира на участки, нарушая естественное течение 93 процентов всемирного речного стока, а почти 28 процентов водотока считается значительно или жестко зарегулированным.²⁷ Только в бассейне Амазонки в настоящее время проектируются, строятся или планируются к возведению более 400 плотин.²⁸ В своей совокупности строительство плотин и автомобильных дорог, а также вырубка лесов подрывают экологическую целостность континентальных речных бассейнов, что в свою очередь влечет за собой реальные последствия для других видов экономической и рекреационной деятельности человека. Например, связность пресных водоемов ежегодно приносит около 200 млн долл. США в рыбопромысловую экономику бассейна Амазонки, которая обеспечивает занятость примерно 200 000 рыбаков.²⁹

Фрагментация ландшафта автомобильными дорогами



Источник: Ibsich et al. (2016)³⁰

Анализ массива данных по 36 млн км автодорог по всему миру показывает, что автомобильные дороги разбивают наземный ландшафт на более чем 600 000 участков. Более половины этих участков находятся в радиусе 1 км от любой автодороги (выделено красным цветом). Ближе к областям, отмеченным синим цветом, находятся участки земли, расположенные вдали от всех автодорог, и по этой причине они в меньшей степени подвержены влиянию транспортных потоков.

Река Шингу на севере Бразилии в 2000 и 2017 годах



Фотография предоставлена: Joshua Stevens / NASA Earth Observatory

Строительство плотины гидроэлектростанции Бело Монте в 2011 году кардинальным образом изменило русло реки Шингу. Более 80 процентов речного стока было перенаправлено, в результате чего значительные районы высохли (видны как оранжево-коричневые участки), что оказало прямое воздействие на общины коренных народов и дикую природу этого района.

Реки, ландшафты и береговые линии имеют неразрывные связи. Связность также является подтверждением того, что природа функционирует как единый комплекс ее составных частей. Связность водных и наземных систем имеет жизненно важное значение для экологической целостности, но слишком часто эти элементы управляются по отдельности. Например, исследования экосистем, расположенных в умеренных широтах, свидетельствуют о том, что воздействие гравийных речных пойм простирается далеко за пределы прибрежных зон. Это влияние на подповерхностную экологию суши проецируется за пределы видимого русла рек и их дельт, выходя далеко в море. Системы свободно текущих рек обеспечивают связность водных, птичьих и наземных сообществ — от микроорганизмов до медведей гризли — и на своем пути оказывают влияние на биогеохимию наземных и морских ландшафтов.³¹



Видеоматериал:

Рассеивание семян и фрагментация лесов



Фотография предоставлена: Jess Kraft / Shutterstock
Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=0m6AjWZ2p8I>

© HHMI BioInteractive

Фрагментация и связность ландшафтов

Фрагментация ландшафтов — это разделение крупных, непрерывных ареалов обитания на меньшие по размеру и более изолированные части или участки.

Связность наземных ландшафтов — это количественная мера того, в какой степени конкретный ландшафт позволяет животным и другим экологическим потокам свободно перемещаться.

По мере потепления климата поддержание связности между территориями с различным температурным режимом может позволить организм перемещаться вдоль **градиентов температуры**, обеспечивая адаптацию биологических видов.

Надлежащим образом взаимосвязанные пространства позволяют биологическим видам мигрировать в новые места обитания, особенно когда им необходимо **адаптироваться к изменению климата**.



Фрагментация рек в основном происходит в связи с возведением плотин и созданием водохранилищ, которые разъединяют экосистемы верхнего и нижнего течения, оказывая влияние на пути распространения и миграции биологических видов, а также на перенос органических и неорганических веществ

В мире планируется построить более **3 700 крупных гидроэлектростанций**

Автомобильные дороги изменяют поведенческие модели некоторых биологических видов. Исследования показали, что такие животные, как ежи, гремучие змеи, черепахи, красные белки и улитки избегают пересекать автомобильные дороги.

Перемещению представителей дикой флоры и фауны препятствует транспортная инфраструктура, например **автомобильные и железные дороги**

Такие факторы, как **ширина автодороги**, интенсивность дорожного движения и **кривизна дороги**, также могут оказать влияние на число особей различных биологических видов, гибнущих под колесами автотранспорта

Установлено, что фрагментация ареалов обитания приводит к **сокращению численности популяций ряда высших хищников**

Всемирное исследование показало, что **177 видов млекопитающих** утратили более **30%** своих географических ареалов, а у **40%** этих видов отмечено значительное сокращение численности популяций

Связность суши и моря охватывает биологическую миграцию, гидрологическую цикличность, перенос питательных веществ и другие климатически обусловленные процессы, имеющие жизненно важное значение как для прибрежных, так и для глобальных экосистем

Связность повышает уровень **взаимодействия между растениями и животными**, например при опылении и рассеивании семян. Растения в более взаимосвязанных районах дают больше плодов.



К 2030 году почти **40%** рек мира будут **сильно фрагментированы**

Современная лесохозяйственная практика ухудшает связность ландшафтов

По итогам крупного исследования бассейна Амазонки был сделан вывод о том, что наилучшим способом его защиты от антропогенного воздействия и обеспечения его жизнестойкости перед лицом изменения климата является создание **крупных, обширных и взаимосвязанных природных заповедников**

Крупные плотины возведены в **59%** речных бассейнов мира, а к 2030 году этот показатель достигнет **75%**

Экологические коридоры — это полосы растительности, соединяющие участки ареалов обитания друг с другом, что создает благоприятные условия для перемещения растений и животных

«Плацдармы» экспансии — это сравнительно небольшие участки девственной растительности, разбросанные по ландшафту, которые способствуют перемещению биологических видов и их распространению на большие расстояния

Наличие «плацдармов» позволяет биологическим видам перемещаться между изолированными ареалами обитания и заселять новые ареалы

Создание **коридоров между природными заповедниками** способствует сохранению связности ареалов обитания, что увеличивает видовое богатство этих заповедников

В Бразилии исследование высокочувствительных видов птиц показало, что в **более взаимосвязанных лесах** видов птиц больше, чем в менее взаимосвязанных лесах

Надлежащим образом **взаимосвязанные морские ареалы обитания** являются более жизнестойкими перед лицом изменения климата

Связность жизненно важна для организмов, живущих в **тропическом и субтропическом прибрежном мелководье**, которые зависят от миграции между коралловыми рифами, мангровыми зарослями, эстуариями и экосистемами нижнего течения рек

Исследование коралловых рифов, проведенное в Австралии в заливе Мортон-Бэй, показало, что участки с **более высоким уровнем связности с мангровыми зарослями** отличались большим обилием видов, чем те, которые были изолированы от мангровых зарослей

Содействие внедрению решений, обеспечивающих связность

Сохранение связности является противоядием от фрагментации, и в условиях, когда угрозы природе накладывают повышенную нагрузку как на людской, так и финансовый потенциал реагирования, некоторые страны переходят к осуществлению поэтапных инициатив. В Бразилии сохранение связности положено в основу усилий страны, направленных на достижение амбициозной цели восстановления жизнеспособных взаимосвязей между ареалами обитания в сильно фрагментированных влажных тропических лесах на атлантическом побережье, известных под названием «Мата Атлантика». Некоторые находящиеся под угрозой исчезновения биологические виды находятся в центре внимания проектов по восстановлению биоразнообразия, направленных на воссоединение изолированных популяций, например золотистого львиного тамарина. Показано, что целенаправленное восстановление популяций снижает темпы исчезновения биологических видов в некогда фрагментированных лесных массивах.³² В настоящее время поддержание связности является заявленной целью ряда стратегий в области сохранения биоразнообразия Бразилии. В бразильских законах «О лесах» и «О защите естественной растительности» особо подчеркивается,

что сохранение связности является критически важной стратегией восстановления ландшафтов и сохранения ареалов обитания.^{33,34} В целях восстановления и укрепления связности ландшафтов и их экологических функций правительство Сальвадора недавно предложило объявить период 2021–2030 годов «Десятилетием восстановления экосистем» под эгидой Организации Объединенных Наций.

В Африке правительство Танзании недавно приняло новый закон «Об охране дикой природы», в котором подчеркивается необходимость более активного сохранения коридоров дикой природы на охраняемых природных территориях. В Кении, где большая часть дикой природы находится за пределами охраняемых природных территорий, а планирование на уровне округов только начинается, Служба охраны дикой природы Кении составила систематический каталог ключевых коридоров дикой природы и районов распространения дикой флоры и фауны и разработала национальную политику по вопросам коридоров дикой природы.³⁵

В акватории Мирового океана связность проявляется в трехмерном пространстве, поскольку водная толща вводит в экологию перемещений дополнительную переменную. Море само по себе является связующей средой. Таким образом, связность

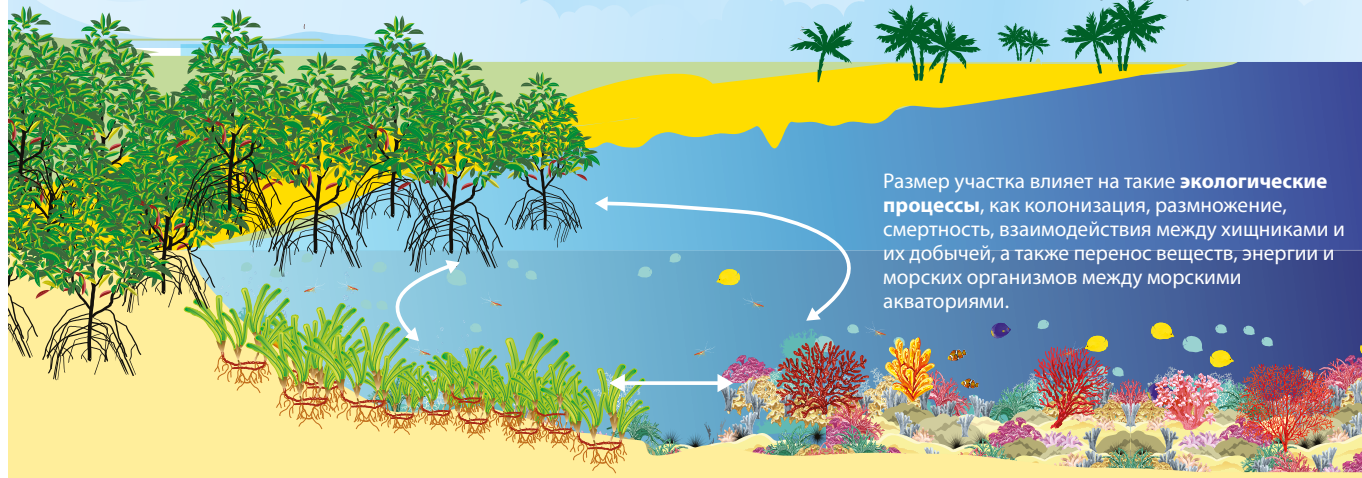
Связность морских ландшафтов

Связность морских ландшафтов — это то, насколько морской ландшафт способствует или препятствует перемещениям

Прибрежные ареалы обитания существуют как компоненты функционально взаимосвязанных мозаичных структур, поэтому фрагментация или утрата ареала обитания может нарушить целостность соседних аналогов

Подвижные организмы перемещаются между экосистемами в поисках корма, для нереста и в порядке миграции, в то время как **сидячие биологические виды** полагаются на приливные режимы и течения как средство доставки пищи и питательных веществ и распространения личинок.

Размер участка влияет на такие **экологические процессы**, как колонизация, размножение, смертность, взаимодействия между хищниками и их добычей, а также перенос веществ, энергии и морских организмов между морскими акваториями.



морской среды проявляется по-разному: в форме взаимосвязей между морем и прибрежными районами, взаимодействий между поверхностью моря и морским дном и как составная часть динамики океанических течений.³⁶ В этой тесно взаимосвязанной среде морские охраняемые природные акватории, являющиеся краеугольным камнем сохранения океана, практически не могут функционировать как экологически изолированные участки. Море как таковое способствует созданию экологических сетевых структур, соединяющих критически важные ареалы обитания в пространстве и во времени.

Более того, многие морские биологические виды, пережившие сложные этапы в своем развитии, в процессе эволюции изменялись вместе с динамикой перемен в водной среде этого изменчивого мира. Морские водоросли и мангровые болота — это хорошо известные ареалы обитания детенышей многих морских биологических видов, которым затем нередко приходится перемещаться к коралловым рифам, подводным горам или другим водам для нагула. Отмечается, что обеспечение связности морских ландшафтов является ключевым руководящим принципом сохранения морской среды и пространственного планирования, а также усилий по ее восстановлению; однако на практике этот принцип редко используется в процессе проектирования сетей морских заповедников.³⁶⁻³⁹ Это в значительной степени объясняется нехваткой на этапе проектирования количественных данных по целому ряду параметров связности, например, по характеру распространения и перемещения ключевых биологических видов на различных этапах жизни, экологической связности внутри заповедников и за их пределами, а также по связности различных ареалов обитания и по генетической взаимосвязанности популяций.^{10,38-40} Тем не менее исследования, направленные на выявление зависимости показателей эффективности морских заповедников от связности их экосистем, которые были проведены в Карибском бассейне, на островах Флорида-Кис, на Соломоновых островах, в Мортон-Бэй и на акватории Большого Барьерного рифа в Австралии, свидетельствуют об экологической значимости повышения уровня связности. На этих охраняемых природных территориях и акваториях наблюдалась положительная динамика с точки зрения обилия, видового богатства, состава популяций рыбы и их пополнения, а также отмечалось положительное воздействие на различные экологические процессы.^{10,41-44}

Международное сообщество прилагает усилия для содействия поиску решений в области обеспечения связности. В 2016 году Международный союз охраны природы (МСОП) учредил Группу специалистов по сохранению связности (ГССС), с тем чтобы способствовать реализации все возрастающего числа мероприятий по сохранению связности и придать этой работе новый импульс. Основным направлением деятельности ГССС, в состав которой входят около 900 членов из 80 стран, является наращивание потенциала практических действий по последовательному сохранению связности во всем мире посредством развития сетей взаимодействия и представления рекомендаций на основе сочетания научного, инженерного и политического опыта.



Видеоматериал: Что означает связность морской среды?



Фотография предоставлена: Damsea / Shutterstock
Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=MowPR5GYqKM>

© Ifremer



Видеоматериал: За кулисами миграции красного краба — остров Рождества, 2012 год



Фотография предоставлена: David Stanley
Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=n9y151LQ0s>

© Parks Australia

Постановка целевых задач по обеспечению связности в будущем

Айтинские целевые задачи в области биоразнообразия, принятые участниками Конвенции о биологическом разнообразии (КБР) в качестве составной части Стратегического плана по биоразнообразию на 2011–2020 годы, охватывают вопросы обеспечения связности наземных и морских ландшафтов. Целевая задача 11, принятая в Айти, гласит, что не менее 17 процентов районов суши и внутренних вод и 10 процентов прибрежных и морских районов должны сохраняться во всем мире за счет хорошо связанных между собой систем охраняемых районов. И все же многие ученые полагают, что в наши дни в области сохранения биоразнообразия следует ставить перед собой более амбициозную цель.^{45,46} Научное сообщество, занимающееся вопросами охраны природы, утверждает, что в среднем 50 процентов всех земель и морей нуждаются в управлении, обеспечивающем поддержание устойчивости экологических процессов, которые предопределяют состояние природы и критические пороговые показатели здоровья нашей планеты, включая экосистемные услуги, создающие источники средств к существованию человека.^{4,14,15} Во многих областях, имеющих глобальное экологическое значение, постановка более смелых целей является научно обоснованным и политически поддерживаемым подходом. Например, необходимо увеличить степень защиты бассейна реки Амазонки, что будет способствовать поддержанию устойчивости региональных и глобальных гидрологических и климатических функций этого обширного водосборного бассейна. Согласно ландшафтному моделированию, если более 20 процентов лесов Амазонии будет утрачено, это приведет к переходу через пороговое значение, что в конечном итоге превратит тропические леса в саванны и в свою очередь скажется на климате во всем мире.⁴⁷ В процессе реализации Айтинских целевых задач в области биоразнообразия правительство Бразилии поставило перед собой амбициозную цель постановки под охрану 30 процентов Амазонии при одновременном обеспечении того, чтобы каждый из других биомов, выделенных на территории страны, соответствовал 17-процентному целевому показателю, согласованному в Айти.⁴⁸ Следующий десятилетний стратегический план осуществления КБР, охватывающий период 2021–2030 годов, будет обсуждаться в октябре 2020 года в Китае. Поборники охраны природы с энтузиазмом восприняли идею, согласно которой конечные цели 11-й целевой задачи в области биоразнообразия, принятой в Айти, могут быть сформулированы с учетом более амбициозного подхода и в русле устремлений участников инициативы «50% — природе» к 2050 году.

Хотя до настоящего времени значительные усилия были в первую очередь сосредоточены на достижении процентных показателей охраны земель, пресных водоемов и морей, сейчас имеется понимание того, что в отношении преобразования тесно связанной системы охраняемых природных территорий и осуществления других эффективных природоохранительных мер на порайонной основе можно было бы сделать гораздо больше. Научные данные недвусмысленно свидетельствуют о том, что взаимосвязанные охраняемые природные территории являются более эффективными охраняемыми природными территориями.^{49,50}



Коридоры дикой природы являются широко распространенной стратегией обеспечения связности в целях защиты мигрирующих биологических видов. Эти коридоры нередко предназначены для конкретного биологического вида, например вилоровой антилопы в Северной Америке, тигров в Азии и пятнистого ягуара в Южной Америке, и ориентированы на его потребности. Формы и размеры коридоров имеют значительные отличия в зависимости от использующих их биологических видов, состояние которых вызывает озабоченность, и ограничений, налагаемых особенностями ландшафта, и варьируются в широком диапазоне: от неприметных линейных троп до участков ареалов обитания, являющихся «плацдармом» экспансии, которые облегчают миграцию птицам или морским черепахам.

Соединяющие зоны представляют собой более крупные районы наземных или морских ландшафтов, которые являются средством обеспечения связности в интересах широкого спектра биологических видов и экологических процессов. К этим зонам относятся крупные массивы суши или моря, которые способствуют распространению биологических видов на всех охраняемых природных территориях, что имеет решающее значение в таких регионах, как Восточная Африка, где подавляющее большинство представителей дикой флоры и фауны обитают за пределами охраняемых природных территорий. Соединяющие зоны также облегчают перемещение животных, биомассы и энергии между участками ареалов обитания или между различными экосистемами, расположенными в пределах охраняемых природных территорий.

Зоны проницаемости являются самой масштабной концепцией, используемой защитниками природы для сохранения экологически важных взаимосвязей за пределами охраняемых природных территорий в регионах, где доминирует человек. Эти районы обеспечивают сезонные потребности биологических видов или возможность их пространственного перемещения и/или экологические процессы, например, доступ к весенним водоемам или конкретным гидрологическим потокам пресной воды.

Климатические коридоры предлагаются учеными в качестве средства сохранения возможности перемещения биологических видов по температурным градиентам; эти же коридоры зачастую служат «климатическими убежищами».⁵¹ Часть усилий в области сохранения связности, например в рамках Инициативы по сохранению Великих восточных хребтов в Австралии, напрямую нацелена на поддержание жизнестойкости перед лицом изменения климата.⁵²

Восстановление связности фрагментированных наземных и морских ландшафтов при посредстве экологических сетевых структур может эффективно повысить функциональность природы и стимулировать более амбициозные подходы к ее сохранению.

В настоящее время охраняемые природные территории охватывают 14,7 процента земель во всем мире, но взаимосвязанными являются менее половины из них.⁵⁰ Эти

статистические данные дают основания предположить, что возможности повышения уровня связности охраняемых природных территорий во всем мире далеко не исчерпаны. Если мировое сообщество действительно стремится к тому, чтобы широкомасштабные природоохранные действия осуществлялись быстрыми темпами, следует придерживаться концепции обеспечения связности охраняемых природных территорий при посредстве экологических сетевых структур, опыт продвижения которой вселяет надежду.

В более широкой природоохранной практике применение концепции сохранения связности все еще находится на сравнительно раннем этапе своего развития, поэтому для усовершенствования передовых методик еще многому предстоит научиться.^{53,54} В качестве формирующейся практики сохранения экологической связности сталкивается с наибольшими проблемами при ее реализации за пределами охраняемых природных территорий. Ограничение воздействия сил, приводящих к фрагментации экосистем, например, в результате развития линейной инфраструктуры, со всей очевидностью является насущной необходимостью. Не меньшее значение имеет информирование лиц, определяющих политический курс, сотрудников правительственных ведомств и заинтересованных сторон в местных общинах о важности обеспечения экологической связности. В то время как некоторые страны могут ввести в силу нормативно-правовые меры, обеспечивающие сохранение связности, подавляющее большинство усилий в области сохранения экологической связности будет опираться на основанные на стимулах подходы к ее сохранению на основе широкого участия.⁵⁵ Изменение действующих политических установок в области природоохранной деятельности может способствовать более широкому принятию мер по сохранению связности путем включения целевых показателей уровня связности как в оценки воздействия на окружающую среду, так и в различные программы финансирования природоохранной деятельности и введения налоговых стимулов.

Охраняемые природные территории сами по себе не в состоянии обеспечить сохранение биоразнообразия или взаимосвязанных функций природных систем, поддерживающих жизнь на нашей планете. Связность — это суть экологии, которая является наукой о взаимозависимости. Ее обеспечение является настоятельным требованием, поскольку взаимосвязанные земли, пресные водоемы и моря являются источником жизненной силы девственной природы. Таким образом, взаимосвязанные сетевые структуры представляют собой наилучшую возможность для поддержания и восстановления экологических и эволюционных процессов, предотвращения исчезновения биологических видов и защиты наземных, пресноводных и морских экосистем, жизненно важных для человечества и всего живого. Связность может обеспечить, чтобы экосистемы во всем мире стали более жизнестойкими и адаптируемыми к глобальным изменениям и обладали способностью поддерживать экологическую целостность, отвечающую потребностям нынешнего и будущих поколений. Пока идет борьба с силами, способствующими фрагментации экосистем, сохранение связности, по сути, создает сеть безопасности для сохранения биоразнообразия и в конечном счете для выживания человечества.

«Плацдармы» и переходы

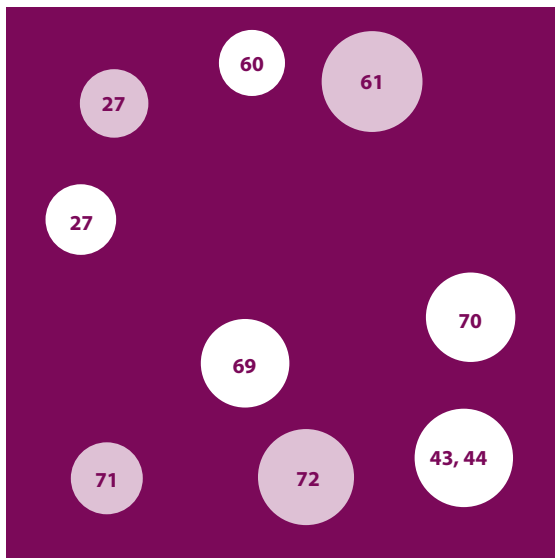


Список использованной литературы

- Cullen-Unsworth, L.C. and Unsworth, R. (2018). A call for seagrass protection. *Science* 361(6401), 446-448. <https://doi.org/10.1126/science.aat7318>
- Tucker, M.A., Böhning-Gaese, K., Fagan W.F., Fryxell J.M., Van Moorter, B., Alberts, S.C. *et al.* (2018) Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science* 359(6374), 466-469. <https://doi.org/10.1126/science.aam9712>
- Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D. *et al.* (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances* 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
- Wilson, E.O. (2016). *Half-Earth: our planet's fight for life*. London: W.W. Norton & Company
- Fahrig, L. (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 34, 487-515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
- Laurance, W.F., Nascimento, H.E.M., Laurance, S.G., Ana Andrade, A., Ewers, R.M., Harms, K.E. *et al.* (2007) Habitat fragmentation, variable edge effects, and the landscape-divergence hypothesis *PLoS ONE* 2(10), e1017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001017>
- Crook, D.A., Winsor, H., Lowe, W.H., Allendorf, F.W., Eros, T., Finn, D.S., Gillanders, B.M. *et al.* (2015) Human effects on ecological connectivity in aquatic ecosystems: Integrating scientific approaches to support management and mitigation. *Science of The Total Environment* 534, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.034>
- Crooks, K.R., Burdett, C.L., Theobald, D.M., King, S.R.B., Di Marco, M., Rondinini, C. *et al.* (2017) Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(29), 7635-7640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705769114>
- Laurance, W.F., Camargo, J.L.C., Luizão, R.C.C., Laurance, S.G., Pimm, S.L., Bruna, E.M. *et al.* (2011) The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation* 144(1), 56-67. <http://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.021>
- Olds, A.D., Connolly, R.M., Pitt, K.A., Pittman, S.J., Maxwell, P.S., Huijbers, C.M. *et al.* (2015). Quantifying the conservation value of seascape connectivity: a global synthesis. *Global Ecology and Biogeography* 25, 3-15. <https://doi.org/10.1111/geb.12388>
- MacArthur, R.H. and Wilson, E.O. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Gilbert-Norton, L., Wilson, R., Stevens, J.R. and Beard, K.H. (2010). A meta-analytic review of corridor effectiveness. *Conservation Biology* 24(3), 660-668. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01450.x>
- Heller, N.E. and Zavaleta, E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142(1), 14-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.006>
- Noss, R.F., Dobson, A.P., Baldwin, R., Beier, P. Davis, C.R., Dellasala, D.A. *et al.* (2012) Bolder thinking for conservation. *Conservation Biology* 26(1), 1-4. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01738.x>
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N.D., Wikramanayake, E. *et al.* (2017). An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience* 67(6), 534-545. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014>
- Barnosky, A.D., Hadly, E.A., Bascompte, J., Berlow, E.L., Brown, J.H., Fortelius, M. *et al.* (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486(7401), 52. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
- McGuire, J.L., Lawler, J.J., McRae, B.H., Nunez, T.A. and Theobald, D.M. (2016). Achieving climate connectivity in a fragmented landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(26), 7195-7200. <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1602817113>
- Ellis, E.C., Goldewijk, K.K., Siebert, S., Lightman, D. and Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography* 19(5), 589-606. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>
- Oakleaf, J.R. and Kennedy, C.M. (2016). Comparison of global human modification and human footprint maps. *The Nature Conservancy*. http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/lands/science/publications/Documents/HM_HF_comparison_documentation.pdf
- Venter, O., Sanderson, E.W., Magrath, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R. *et al.* (2016). Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications* 7, 12558. <https://doi.org/10.1038/ncomms12558>
- Watson, J.E.M., Shanahan, D.F., Di Marco, M., Allan, J., Laurance, W.F., Sanderson, E.W. *et al.* (2016). Catastrophic declines in wilderness areas undermine global environment targets. *Current Biology* 26, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.08.049>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., and Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Jones, K.R., Klein, C.J., Halpern, B.S., Venter, O., Grantham, H., Kuempel, C.D. *et al.* (2018). The location and protection status of Earth's diminishing marine wilderness. *Current Biology* 28(15), 2506-2512. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.010>
- Laurance, W.F., Clements, G.R., Sloan, S., O'Connell, C.S., Mueller, N.D., Goosem, M. *et al.* (2014). A global strategy for road building. *Nature* 513(7517), 229. <https://doi.org/10.1038/nature13717>
- Habib, B., Rajvanshi, A., Mathur, V.B., and Saxena, A. (2016). Corridors at crossroads: Linear development-induced ecological triage as a conservation opportunity. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4, 132. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00132>
- Dulac, J. (2013). Global land transport infrastructure requirements - estimating infrastructure capacity and costs to 2050. Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TransportInfrastructureInsights_FINAL_WEB.pdf
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A.E., MacDonald, G.K., Zarfl, C. and Liermann, C.R. (2015) An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters* 10(1). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/1/015001/meta>
- Fundación Proteger, International Rivers and ECOA (2018). Dams in Amazonia website. <http://dams-info.org/>
- Tundisi, J.G., Goldemberg, J., Matsumura-Tundisi, T. and Saraiva, A.C.F. (2014). How many more dams in the Amazon? *Energy Policy* 74, 703-708. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.013>

30. Ibsch, P.L., Hoffmann, M.T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., DellaSala, D.A., et al. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 354(6318), 1423-1427. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7166>
31. Hauer, F.R., Locke, H., Dreitz, V.J., Hebblewhite, M., Lowe, W.H., Muhlfeld, C.C. et al. (2016). Gravel-bed river floodplains are the ecological nexus of glaciated mountain landscapes. *Science Advances* 2(6), e1600026. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600026>
32. Newmark, W.D., Jenkins, C.N., Pimm, S.L., McNeally, P.B. and Halley, J.M. (2017). Targeted habitat restoration can reduce extinction rates in fragmented forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(36), 9635-9640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705834114>
33. Garcia, L.C., Santos, J.S., Matsumoto, M., Silva, T.S.F., Padovezi, A., Sparovek, G. et al. (2013). Restoration challenges and opportunities for increasing landscape connectivity under the new Brazilian Forest Act. *Natureza & Conservação* 11(1), 181-185. <http://dx.doi.org/10.4322/natcon.2013.028>
34. Brancalion, P.H.S., Garcia, L.C., Loyola, R., Rodrigues, R.R., Pillar, V.P., and Lewinsohn, T.M. (2012). A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives. *Natureza & Conservação* 14(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003>
35. Ojwang', G.O., Wargute, P.W., Said, M.Y., Worden, J.S., Davidson, Z., Muruthi, P. et al. (2017). Wildlife Migratory Corridors and Dispersal Areas: Kenya Rangelands and Coastal Terrestrial Ecosystems. Nairobi: Kenya Wildlife Service
36. Carr, M.H., Robinson, S.P., Wahle, C., Davis, G., Kroll, S., Murray, S. et al. (2017). The central importance of ecological spatial connectivity to effective marine protected areas and to meeting the challenges of climate change in the marine environment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 27(S1), 6–29. <https://doi.org/10.1002/aqc.2800>
37. Magris, R.A., Pressey, R.L., Weeks, R. and Ban, N.C. (2014). Integrating connectivity and climate change into marine conservation planning. *Biological Conservation* 170, 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.032>
38. Green, A.L., Maypa, A.P., Almany, G.R., Rhodes, K.L., Weeks, R., Abesamis, R.A. et al. (2015). Larval dispersal and movement patterns of coral reef fishes, and implications for marine reserve network design. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 90(4), 1215–1247. <https://doi.org/10.1111/brv.12155>
39. Engelhard, S.L., Huijbers, C.M., Stewart-Koster, B., Olds, A.D., Schlacher, T.A. and Connolly, R.M. (2016). Prioritising seascape connectivity in conservation using network analysis. *Journal of Applied Ecology* 54(4), 1130–1141. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12824>
40. Foster, N.L., Paris, C.B., Kool, J.T., Baums, I.B., Stevens, J.R., Sanchez, J.A., Bastidas, C. et al. (2012). Connectivity of Caribbean coral populations: complementary insights from empirical and modelled gene flow. *Molecular Ecology* 21(5), 1143–1157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05455.x>
41. Huntington, B.E., Karnauskas, M., Babcock, E.A. and Limran, D. (2010). Untangling natural seascape variation from marine reserve effects using a landscape approach. *PLoS ONE* 5, e12327. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012327>
42. Valentine, J.F., Heck, K.L., Jr, Blackmon, D., Goecker, M.E., Christian, J., Kroutil, R.M. et al. (2008). Exploited species impacts on trophic linkages along reef-seagrass interfaces in the Florida keys. *Ecological Applications* 18(6), 1501–1515. <https://doi.org/10.1890/07-1720.1>
43. Olds, A.D., Pitt, K.A., Maxwell, P.S. and Connolly, R.M. (2012). Synergistic effects of reserves and connectivity on ecological resilience. *Journal of Applied Ecology* 49(6), 1195–1203. <https://doi.org/10.1111/jpe.12002>
44. Olds, A.D., Albert, S., Maxwell, P.S., Pitt, K.A. and Connolly, R.M. (2013). Mangrove-reef connectivity promotes the functioning of marine reserves across the western Pacific. *Global Ecology and Biogeography* 22(9), 1040–1049. <https://doi.org/10.1111/geb.12072>
45. Butchart, S.H., Clarke, M., Smith, R.J., Sykes, R.E., Scharlemann, J.P., Harfoot, M. et al. (2015). Shortfalls and solutions for meeting national and global conservation area targets. *Conservation Letters* 8(5), 329-337. <https://doi.org/10.1111/conl.12158>
46. Dudley, N., Jonas, H., Nelson, F., Parrish, J., Pyhälä, A., Stolton, S. et al. (2018). The essential role of other effective area-based conservation measures in achieving big bold conservation targets. *Global Ecology and Conservation* 15, e00424. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00424>
47. Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G. et al. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications* 8, 14681. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>
48. Pacheco, A.A., Neves, A.C.O. and Fernandes, G.W. (2018). Uneven conservation efforts compromise Brazil to meet the Target 11 of Convention on Biological Diversity. *Perspectives in Ecology and Conservation* 16(1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.12.001>
49. Beier, P. and Noss, R.F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology* 12(6), 1241-1252. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x>
50. Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A. and Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators* 76, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>
51. Krosby, M., Tewksbury, J., Haddad, N.M. and Hoekstra, J. (2010). Ecological connectivity for a changing climate. *Conservation Biology* 24(6), 1686-1689. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01585.x>
52. Pulsford, I., Fitzsimons, J. and Wescott, G. (eds.) (2013). *Linking Australia's landscapes: Lessons and opportunities from large-scale conservation networks*. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12060>
53. Correa Ayram, C.A., Mendoza, M.E., Etter, A. and Salicrup, D.R.P. (2016). Habitat connectivity in biodiversity conservation: a review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography* 40(1), 7-37. <https://doi.org/10.1177%2F0309133315598713>
54. Worboys, G., Francis, W.L. and Lockwood, M. (eds.) (2010). *Connectivity conservation management: a global guide (with particular reference to mountain connectivity conservation)*. London: Earthscan
55. Watson, J.E.M., Venter, O., Lee, J., Jones, K.R., Robinson, J.G., Possingham, H.P. et al. (2018) Protect the last of the wild, 31 October. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07183-6>

Список использованных графических материалов



56. Didham, R. (2010). The Ecological Consequences of Habitat Fragmentation. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021904>

57. Clevenger, A. P. and Wierzchowski, J. (2006) Maintaining and restoring connectivity in landscapes fragmented by roads. In Crooks, K. R. and Sanjayan, M. (eds), *Connectivity Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press, 502–535. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754821.023>

58. Nuñez, T., Lawler, J., Mcrae, B., Pierce, J., Krosby, M., Kavanagh, D., Singleton, P. et al (2013). Connectivity Planning to Address Climate Change. *Conservation Biology*, 27(2), 407-416. <https://doi.org/10.1111/cobi.12014>

59. Proctor, S., McClean, C. and Hill, J. (2011). Protected areas of Borneo fail to protect forest landscapes with high habitat connectivity. *Biodiversity and Conservation*, 20(12), 2693-2704. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0099-8>

60. Bergsten, A., Bodin, Ö. and Ecke, F. (2013). Protected areas in a landscape dominated by logging – A connectivity analysis that integrates varying protection levels with competition–colonization tradeoffs. *Biological Conservation*, 160, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.01.016>

61. Laurance, W. and Useche, D. (2009). Environmental Synergisms and Extinctions of Tropical Species. *Conservation Biology*, 23(6), 1427-1437. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01336.x>

62. Morris, R. (2010). Anthropogenic impacts on tropical forest biodiversity: a network structure and ecosystem functioning perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1558), 3709-3718. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0273>

63. Trombulak, S. and Frissell, C. (2000). Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, 14(1), 18-30. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>

64. Chen, H.L. and Koprowski, J.L. (2016). Differential effects of roads and traffic on space use and movements of native forest-dependent and introduced edge-tolerant species. *PLoS ONE*, 11(1), e0148121. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148121>

65. Shepard, D.B., Kuhn, A.R., Dreslik, M.J. and Phillips, C.A. (2008). Roads as barriers to animal movement in fragmented landscapes. *Animal Conservation*, 11, 288-296. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2008.00183.x>

66. Gurrutxaga, M. and Saura, S. (2013). Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity. *Environmental Conservation*, 41(02), 157-164. <https://doi.org/10.1017/S0376892913000325>

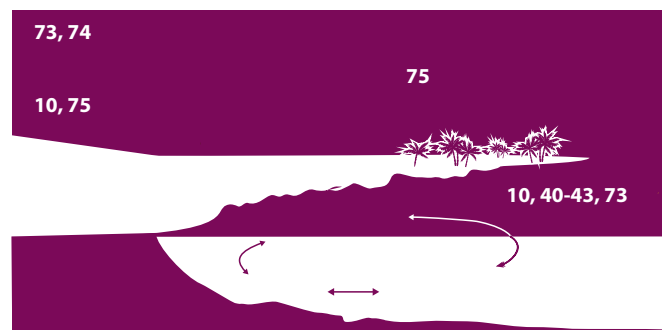
67. Ceballos, G., Ehrlich, P. and Dirzo, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), E6089-E6096. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114>

68. Tewksbury, J., Levey, D., Haddad, N., Sargent, S., Orrock, J., Weldon, A., Danielson, B., et al (2002). Corridors affect plants, animals, and their interactions in fragmented landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20), 12923-12926. <https://doi.org/10.1073/pnas.202242699>

69. Brudvig, L.A., Damschen, E.I., Tewksbury, J.J., Haddad, N.M. and Levey, D.J. (2009). Landscape connectivity promotes plant biodiversity spillover into non-target habitats. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(23), 9328-9332. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0809658106

70. Martensen, A.C., Ribeiro, M.C., Banks-Leite, C., Prado, P.I. and Metzger, J.P. (2012). Associations of forest cover, fragment area, and connectivity with neotropical understory bird species richness and abundance. *Conservation Biology*, 26(6), 1100-1111. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01940.x>

71. Fox, A.D., Henry, L-A., Corne, D.W. and Roberts, J.M. (2016). Sensitivity of marine protected area network connectivity to atmospheric variability. *Royal Society Open Science*, 3: 160494. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.160494>
72. Fang, X., Hou, X., Li, X., Hou, W., Nakaoka, M. and Yu, X. (2018). Ecological connectivity between land and sea: a review. *Ecological Research*, 33, 51–61. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1549-x>



73. Grober-Dunsmore, R., Pittman, S.J., Caldwell, C., Kendall, M.S. and Frazer, T.K. (2009). A landscape ecology approach for the study of ecological connectivity across tropical marine seascapes. In: Nagelkerken, I. (ed), *Ecological connectivity among tropical coastal ecosystems*. Springer, Dordrecht, 493–530. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2406-0_14
74. Earp, H.S., Prinz, N., Cziesielski, M.J. and Andskog, M. (2018). For a world without boundaries: Connectivity between tropical ecosystems in times of change. In S. Jungblut, V. Liebich and M. Bode (eds.), *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*. Proceedings of the 2017 conference for YOUnG MARine REsearchers in Kiel, Germany. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93284-2_9
75. Boström, C., Pittman, S.J., Simenstad, C. and Kneib, R.T. (2011). Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Marine Ecology Progress Series*, 427, 191-217. <https://doi.org/10.3354/meps09051>



*Вечномерзлые торфяники с многочисленными озерными впадинами на мысе Болванский Нос, Россия
Фотография предоставлена: Hans Joosten*

Вечномерзлые торфяники: теряя почву под ногами в теплеющем мире

Ускорение изменений в Арктике

Торфяники, расположенные в тропиках, являются точкой притяжения внимания всего мира, поскольку они играют важнейшую роль в накоплении углерода и смягчении последствий изменения климата. В них хранится почти 120 гигатонн углерода, связанного в торфе, но это составляет лишь около 20 процентов всего углерода, удерживаемого торфяниками мира.¹ Наибольшие объемы хранятся в самых северных районах нашей планеты, при этом в северном приполярном регионе удерживается почти половина мирового органического углерода почвы, в основном в виде вечномерзлого торфа.²⁻⁵

Значительная часть грунта в северном полушарии замерзает и оттаивает сезонно, а оставшаяся часть остается замороженной круглый год. В подпочвенном слое примерно 23 миллионов квадратных километров северных территорий лежит вечная мерзлота — грунт, температура которого не менее двух лет подряд является отрицательной. Арктические и субарктические торфяники расположены в зонах вечной мерзлоты на территориях

Дании/Гренландии, Канады, Норвегии, России, Соединенных Штатов Америки, Финляндии и Швеции. Вечномерзлые торфяники с торфяным слоем толщиной более 40 сантиметров занимают более 1,4 миллиона квадратных километров, а еще большая территория покрыта менее толстым слоем торфа.^{3,6-8} Обширные залежи вечномерзлого торфа можно также обнаружить далеко за пределами арктического и субарктического регионов, например в Монголии и на Цинхайско-Тибетском плато, где горные хребты препятствуют движению теплого океанического воздуха вглубь страны, а зимние температуры очень низкие.^{9,10}

Состояние вечномерзлых торфяников стремительно меняется. В Арктике темпы потепления сейчас вдвое выше среднемировых.¹¹ За последние десятилетия южные границы вечной мерзлоты отступили к северу на 30–80 км, что привело к значительному сокращению размеров этой зоны.¹²⁻¹⁵ Риски, связанные с деградацией вечной мерзлоты, заключаются в том, что мобилизация и микробное разложение ранее захороненного замороженного органического вещества могут привести к высвобождению значительных количеств двуокси углерода

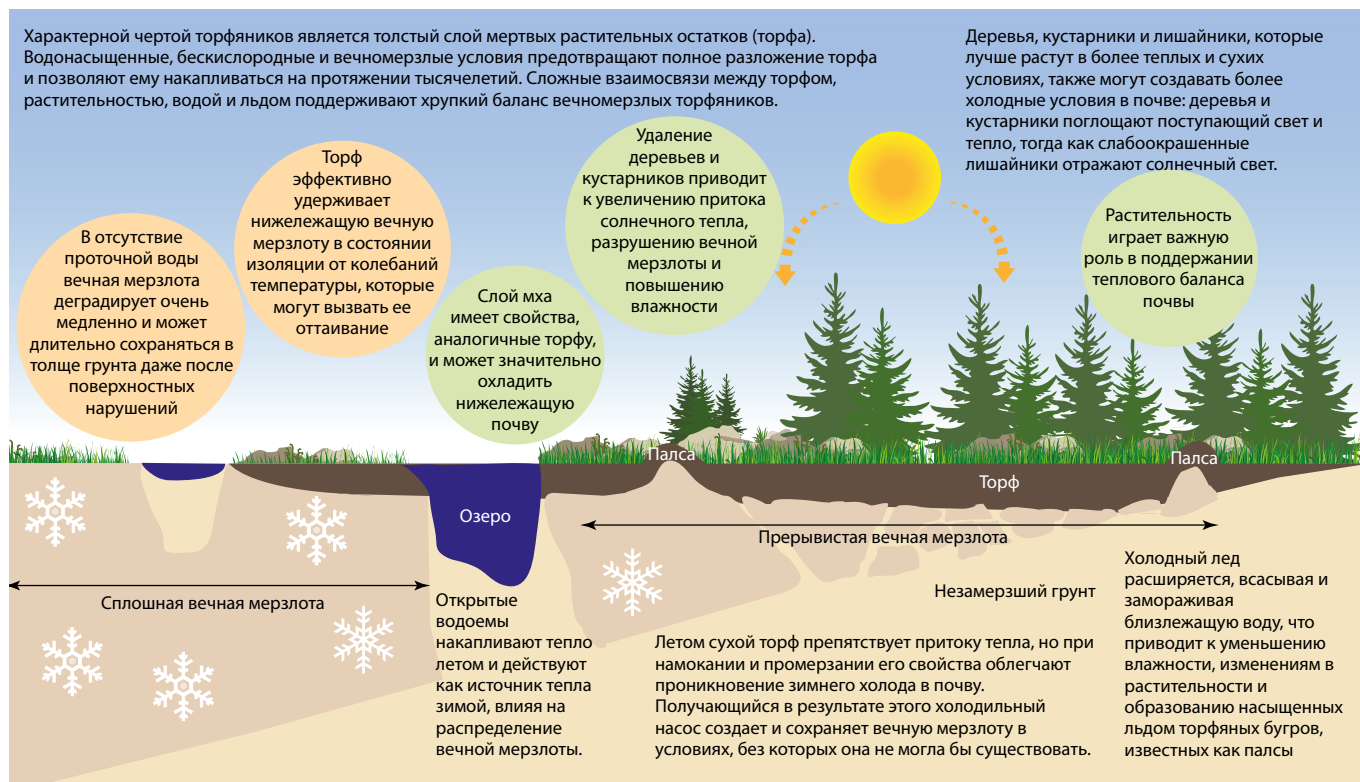
и метана, что, в свою очередь, может значительно усилить глобальное потепление.¹⁶⁻¹⁹ Широкомасштабная деградация вечной мерзлоты также окажет огромное прямое воздействие на экосистемы, гидрологию и инфраструктуру этих регионов.

Хотя вечная мерзлота активно изучается уже более ста лет, для углубления понимания того, как она реагирует на изменение климата и воздействие антропогенных факторов, крайне необходимо провести дополнительные научные исследования ее распределения, характеристик и динамики ее изменений.²⁰ В том, что касается торфяников, расположенных в зоне вечной мерзлоты, имеющиеся знания еще более ограничены. Поскольку взаимодействие вечной мерзлоты, экосистем и климата является чрезвычайно сложным процессом, до сих пор нет полного понимания того, каким образом вечномерзлые торфяники реагируют на потепление климата, и какова их совокупная роль в глобальном изменении климата.²⁰⁻²² Например, хотя замороженные (сухие) и оттаявшие (влажные) участки торфяников могут иметь аналогичные показатели связывания углерода и выступать в качестве поглотителя углерода, на них обычно наблюдаются

совершенно разные показатели потока парниковых газов, и они могут стать чистым источником их выбросов в атмосферу.²³⁻²⁵ Кроме того, с течением времени условия, способствующие замерзанию торфяников в том или ином месте, могут стремительно измениться, что приведет к их оттаиванию.^{23,26}

Оттаивание вечной мерзлоты рассматривается как один из важнейших «переломных моментов» в климатическом равновесии, который может породить безудержный парниковый эффект или неконтролируемое превращение планеты Земля в «теплицу».²⁷ Чтобы избежать такого разрушительного сценария, крайне важно, чтобы во всем мире вечная мерзлота и ее торфяники оставались замороженными и сохраняли свои углеродные отложения.

Торфяники и вечная мерзлота: роль торфа, растений и воды



Оттаивание вечной мерзлоты, разлагающийся торф и сложные взаимодействия

В Арктике любой год последнего десятилетия был теплее, чем самый теплый год XX-го века.¹⁵ В последние десятилетия температура вечной мерзлоты продолжала повышаться по всему миру. Наибольший прирост среднегодовых температур вечной мерзлоты наблюдается в самых холодных районах Арктики, в то время как в «более теплых» зонах вечной мерзлоты и в зонах прерывистой вечной мерзлоты этот прирост значительно меньше. Из-за недавних холодных зим в некоторых местах температура вечной мерзлоты незначительно снизилась.^{15,28}

По мере повышения температуры оттаивание насыщенной льдом вечной мерзлоты или таяние грунтового льда приводит к образованию характерных углублений в ландшафте, известных как термокарст. Формирование термокарста в торфяниках на протяжении последних десятилетий, как представляется, ускорило темпы появления зон прерывистой вечной мерзлоты.²⁹⁻³¹ Однако долгосрочные наблюдения в Арктике не позволяют говорить о единообразии тенденций развития термокарста по причине глобального потепления.¹⁵

Когда замерзшая ранее почва из-за оттаивания распадается, ее оседание создает благоприятные условия для образования новых небольших водоемов, которые позже могут превратиться в озера. Образование термокарстовых озер, в свою очередь, ускоряет оттаивание вечной мерзлоты еще более быстрыми темпами и на большей глубине.¹⁹ С другой стороны, распространение этих озер может также способствовать повышению связности дренажных

 **Видеоматериал:**
Вечная мерзлота – что это такое?



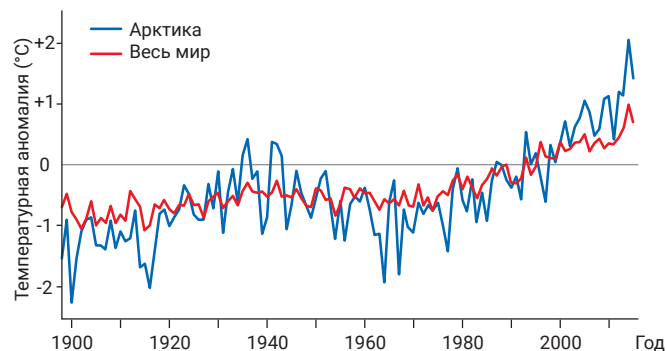
Фотография предоставлена: Hans Joosten

Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=lxixy1u8GjY>

Фотография: Свежеизвлеченный керн вечной мерзлоты,
Походск, Россия

© Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar
und Meeresforschung

Арктика (60–90°с.ш.) и глобальная годовая температура воздуха в нижнем слое атмосферы в сравнении со средней величиной за 1981–2010 годы



Источник: адаптировано на основе «Карты данных по Арктике» за 2018 год (Arctic Report Card 2018), издаваемой Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США.¹¹

сетей, что содействует дренированию озер, возрождению растительности, торфообразованию и восстановлению вечной мерзлоты.³²⁻³⁷ Эти разнонаправленные динамические процессы свидетельствуют о необходимости более глубокого понимания потенциальных последствий тенденции к потеплению.

Изменение климата и повышение температуры приводят к резкому увеличению числа лесных пожаров в Арктике, причем языки пламени уже захватывают пограничные районы тундры и лесотундры. Подпитываемые нижележащими торфяными залежами, пожары высвобождают огромное количество углерода, разрушают растительность и изолирующие слои почвы и уменьшают альбедо (светоотражающую способность) грунта, что приводит к повышению чувствительности к изменению климата и широкому развитию термокарста.³⁸⁻⁴⁴ Даже согласно самым консервативным сценариям прогнозируется, что совокупное воздействие более теплых температур и лесных пожаров будет особенно сильным в зонах прерывистой вечной мерзлоты, но при этом климатические условия станут неблагоприятными и для вечной мерзлоты в целом.³¹ Это может привести к изменениям в типах растительности и ее продуктивности, что, в свою очередь, может повлечь за собой более крупные и частые лесные пожары.^{45,46}

Еще одним следствием ускоренного потепления по причине изменения климата является то, что оттаивание вечной мерзлоты может высвободить в окружающую среду значительное количество метана — сильнодействующего парникового газа. Хотя оценки выбросов метана в атмосферу Арктики сильно различаются, нынешние глобальные климатические прогнозные модели, как представляется, свидетельствуют лишь о незначительном увеличении выбросов метана в северном регионе вечной мерзлоты.^{47,48} Однако адекватного объяснения процессов оттаивания в большинстве моделей не содержится.⁸



Термокарст



Фотография предоставлена: Hans Joosten

Термокарст — это особенность ландшафта, которая образуется в результате таяния грунтового льда в районах с нижележащей вечной мерзлотой, вызывая оседание грунта на поверхности. Типичные термокарстовые образования включают термокарстовые озера, воронки, ямы и впадины на полигональном рельефе местности.^{56,57} Термокарст широко распространен в зонах прерывистой вечной мерзлоты.^{58,59} Он также часто встречается в гораздо более холодных зонах сплошной вечной мерзлоты, где ледяные клинья становятся причиной нестабильности вечной мерзлоты.^{60,61}

Вода, накапливающаяся вследствие термокарстовых процессов, первоначально усиливает приток тепла и деградацию вечной мерзлоты в силу положительной обратной связи. И, напротив, распространение растительности и накопление органических веществ постепенно ограничивает дальнейшее оттаивание в нисходящем направлении. Из-за нового и стремительного накопления торфа в термокарстовых впадинах оттаивание вечной мерзлоты не обязательно превращает торфяники в источник углерода.^{22,23,62} Однако увлажнение почвы, скорее всего, станет причиной высвобождения метана.

В рамках одного из недавних модельных исследований была проведена оценка долгосрочных климатических последствий деградации вечной мерзлоты с учетом резких процессов оттаивания, связанных с недавно образовавшимися термокарстовыми озерами. В результате было высказано предположение о том, что в течение этого столетия выбросы

углерода в атмосферу в форме метана (CH_4) могут составить лишь небольшую долю от общего объема высвобождения углерода из вновь оттаившей вечной мерзлоты, однако за счет вновь оттаившей вечной мерзлоты это может дать до 40 процентов увеличения темпов потепления.⁴⁹

Изменение климата является лишь одним из многих факторов, непосредственно влияющих на изменения в вечномерзлых торфяниках. Любое нарушение поверхностного слоя почвы может привести к деградации вечной мерзлоты и возникновению таких природных явлений, как лесные или тундровые пожары. Вечная мерзлота может пострадать и в связи с антропогенными факторами, такими как развитие промышленной и городской инфраструктуры и строительства, горной добычи, туризма и сельского хозяйства.^{50,51} При осуществлении различных форм деятельности в области развития в зоне вечномерзлых торфяников уникальные особенности этих районов зачастую не принимаются во внимание, что становится причиной фрагментации ландшафта и нарушения круговорота воды в природе.^{14,52} В России 15 процентов территории тундры было разрушено в результате транспортной деятельности, что привело к оттаиванию вечной мерзлоты, эрозии, оседанию грунта и развитию термокарстов.⁵³ Около 45 процентов месторождений нефти и природного газа, разрабатываемых в российской Арктике, расположены в наиболее экологически уязвимых районах, часто на торфяниках, включая Печорский регион, Полярный Урал и северо-западную и центральную части Сибири.^{54,55} Растущий спрос на природные ресурсы и возросшая доступность районов мерзлоты в связи с потеплением климата в будущем могут привести к активизации промышленной и инфраструктурной деятельности, что усугубит нарушение целостности торфяников и вечной мерзлоты. Эти изменения также скажутся на жизни коренных народов, которые традиционно зависели от использования таких земель, как торфяники, в качестве источников продовольствия, корма для северных оленей, дичи и рыбы.¹⁴



Оттаивание и разрушение вечной мерзлоты в Монголии

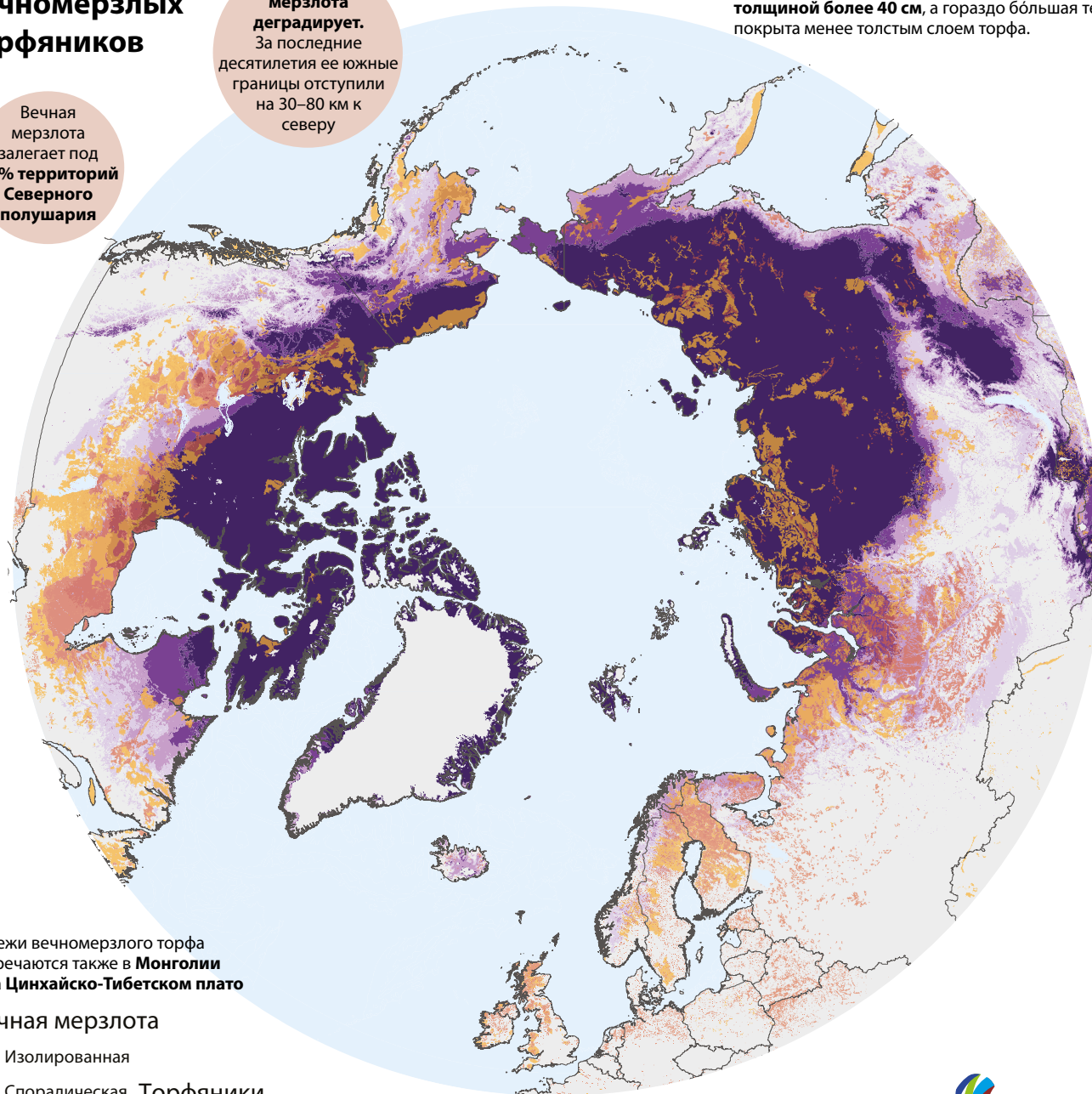
Фотография предоставлена: Hans Joosten

Распределение вечномерзлых торфяников

Вечная мерзлота залегает под **25% территорий Северного полушария**

Вечная мерзлота деградирует. За последние десятилетия ее южные границы отступили на 30–80 км к северу

Торфяники расположены на обширных территориях в зонах вечной мерзлоты. По меньшей мере **1,4 млн км²** вечномерзлых торфяников имеют слой **торфа толщиной более 40 см**, а гораздо большая территория покрыта менее толстым слоем торфа.



Залежи вечномерзлого торфа встречаются также в **Монголии** и на **Цинхайско-Тибетском плато**

Вечная мерзлота

Изолированная

Спорадическая **Торфяники**

Прерывистая

Покрыто >50%

Сплошная

Покрыто 20–50%

 GREIFSWALD
MIRE
CENTRE

Источники геопространственных данных:
Данные по торфяникам предоставлены Грайфсвальдским центром по изучению болот (Грайфсвальд, Германия)

Данные о вечной мерзлоте предоставлены Институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (AWI) (Бремерхафен, Германия), являющимся членом Объединения немецких научно-исследовательских центров им. Гельмгольца. ⁹⁰

Температура в Арктике повышается в два раза быстрее среднемировой

Торфяники являются крупнейшими долгосрочными хранилищами органического углерода всех наземных экосистем

Климатические модели дают основания предположить, что к 2050 году будет утрачено 35% приповерхностного слоя вечной мерзлоты

Кустарники, деревья и лишайники могут сохранять пониженную температуру почвы благодаря своей способности поглощать или отражать солнечный свет. Удаление защитной растительности может вызвать быструю деградацию вечной мерзлоты

Пожары уничтожают изолирующую растительность, торф и почвенные слои, повышая уязвимость торфяников перед лицом изменения климата

Совокупное воздействие потепления климата и лесных пожаров сильнее проявляется в зоне прерывистой вечной мерзлоты

Потепление климата в Арктике повысило пожароопасность в тундровых и лесотундровых районах, что привело к значительному снижению содержания углерода в почве

Когда в результате оттаивания вечной мерзлоты лед, находящийся в торфе, тает, микроорганизмы-деструкторы становятся активными и разлагают органические материалы, что приводит к выбросам CO_2 и CH_4 в атмосферу

Более глубокие водоемы накапливают тепло летом и становятся источником тепла зимой, оказывая влияние на локальное распределение вечной мерзлоты

Термокарст — это характерная впадина в ландшафте, образовавшаяся в результате оттаивания вечной мерзлоты или таяния грунтового льда

В отсутствие потоков поверхностных или подземных вод вечная мерзлота деградирует очень медленно и на глубине может сохраняться в течение длительного времени

Термокарст широко распространен в зоне прерывистой вечной мерзлоты

Торфяники — это территории, на поверхности которых присутствует слой мертвых растительных остатков (торфа). Водонасыщенные и бескислородные условия предотвращают полное разложение торфа.

Приполярные почвы содержат 50% общемировых запасов почвенного углерода, и этот углерод в основном хранится в торфяниках и нередко консервируется в вечной мерзлоте

Согласно прогнозам специалистов к 2100 году зона вечной мерзлоты станет источником углерода

Вечномерзлые почвы, включая торфяные залежи, содержат в два раза больше ртути, чем остальные почвы, атмосфера и океаны всего мира вместе взятые

Оттаивание вечной мерзлоты может высвободить в окружающую среду значительное количество ртути

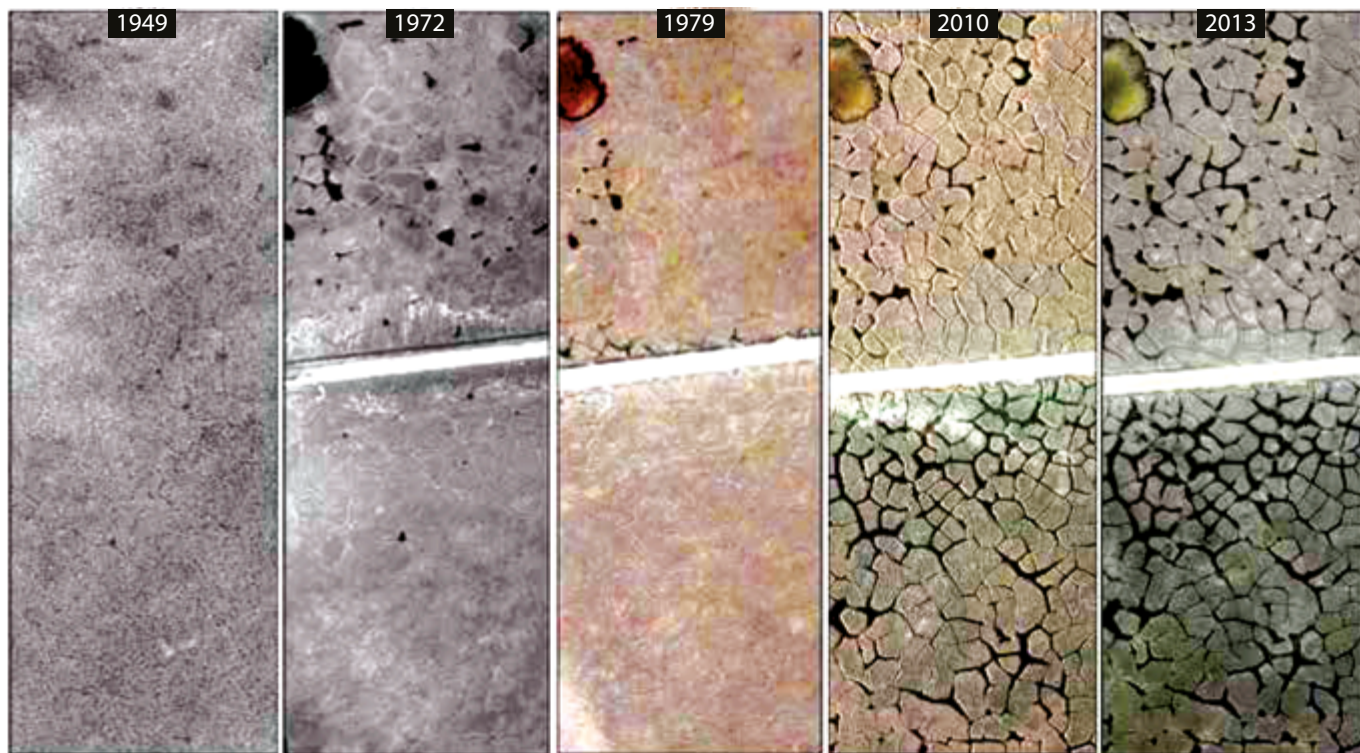
Накопленный в почве органический углерод бывает разного вида (CO_2 или CH_4) и высвобождается при выбросе газа в атмосферу или переносе растворенного органического углерода или его частиц в реки

Повышение осведомленности о вечномёрзлых торфяниках

На протяжении более чем столетия и все чаще в течение последних десятилетий регионы вечной мерзлоты становятся объектом научных исследований и технологических разработок, направленных на решение специфических научно-технических задач, связанных с их освоением. Несмотря на усилия участников Международной ассоциации мерзотоведения и Глобальной наземной сети наблюдений за вечной мерзлотой, в знаниях по конкретным регионам и ареалам обитания сохраняются значительные пробелы, не в последнюю очередь из-за экстремальных климатических условий, ограниченной доступности и сложной геополитической обстановки. Недавний обзор показал, что более 30 процентов всех цитат в научной литературе, связанных с полевыми экспериментами в Арктике, относятся к работам, проведенным на территориях, прилегающих всего к двум исследовательским станциям: близ озера Тулик на Аляске, США, и в национальном парке Абиску в Швеции.⁶³ Это может подорвать научный консенсус и привести к неточным прогнозам последствий изменения климата в Арктике.

Учитывая рост осведомленности об изменении климата и таянии арктических льдов, в последних оценках все чаще предпринимаются попытки охватить такие аспекты, как социально-экологические изменения, смена режимов деятельности человека и их влияние на процессы адаптации и трансформации.^{64,65} Разрабатываются крупномасштабные исследовательские проекты по изучению последствий оттаивания и деградации вечной мерзлоты. К их числу относится инициатива «Освоение Арктики и адаптация к условиям вечной мерзлоты в переходный период» (ADAPT), участники которой ведут совместную работу с 15 лабораториями, расположенными в различных районах Канады, и другими группами исследователей в целях создания комплексной базы научных исследований по системам Земли в канадской Арктике. Специальные законы, такие как закон провинции Онтарио «О Крайнем Севере» 2010 года, сочетаются с новыми инициативами в области планирования в целях открытия и защиты Крайнего Севера посредством процесса планирования землепользования в консультациях с «первыми нациями».⁶⁶

Арктический совет, который среди прочего в 2017 году опубликовал доклад о роли снега, воды, льда и вечной мерзлоты



Прогрессирующее развитие термокарста по причине оттаивания вечной мерзлоты в период 1949–2013 годов на исследовательском объекте, расположенном в заливе Прадхо, Аляска, Соединенные Штаты Америки. Белой линией отмечена автомагистраль Спайн-Роуд, проложенная в 1969 году.

Источник: Walker et al. (2014)⁵²

в Арктике, является примером активного международного сотрудничества, играющего чрезвычайно полезную роль в генерировании и накоплении знаний, необходимых для разработки национальной и международной политики.^{15,67} Хотя и признается, что арктические государства играют ключевую роль в процессе освоения этого региона, усилия других субъектов, призванные обеспечить охрану вечномерзлых торфяников и повышение осведомленности о них, также необходимы. Ряд международных организаций, таких как Межправительственная группа экспертов по изменению климата (опубликовавшая Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата), Всемирная метеорологическая организация и Международный научный совет в лице Международного арктического научного комитета, принимают все более активное участие в этой работе, содействуя повышению уровня осведомленности и понимания последствий экологических изменений в Арктике.



Фотография предоставлена: Hans Joosten

Оттаивание вечной мерзлоты привело к возникновению термокарстовых образований на торфяниках близ Нарьян-Мара, Ненецкий автономный округ, Россия



Закон провинции Онтарио «О Крайнем Севере» и роль «первых наций» в защите вечномерзлых торфяников

На территории между 50–57°с.ш. и 79–94°з.д. расположен **Крайний Север канадской провинции Онтарио** — динамично меняющийся ландшафт, образующий среду обитания биомов арктического, бореального и умеренного пояса. Доминирующей особенностью ландшафта в этом районе являются торфяники, которые покрывают 47 процентов или 21 миллион гектаров территории Крайнего Севера и являются хранилищем около 36 гигатонн углерода в виде торфа.⁶⁸ Это эквивалентно четверти объема углерода, накопленного во всех торфяниках Канады.

В принятом в октябре 2010 года **законе провинции Онтарио «О Крайнем Севере»** признается важная роль районов Крайнего Севера в накоплении и связывании углерода и предусматривается планирование землепользования на уровне общин в качестве одной из стратегий активного противодействия изменению климата.^{66,69} Основное внимание в этом законе уделяется значительной роли «первых наций» — коренных народов Канады, которые не являются метисами или инуитами, — в планировании землепользования, включающем культурные, социальные, экологические и экономические аспекты.

В соответствии с этим законом **стратегия землепользования на Крайнем Севере** предусматривает оказание помощи в подготовке общинных планов землепользования при одновременном учете вопросов, выходящих за рамки отдельных областей планирования, таких как традиционные знания коренных народов. Четыре цели, изложенные в стратегии, предусматривают:

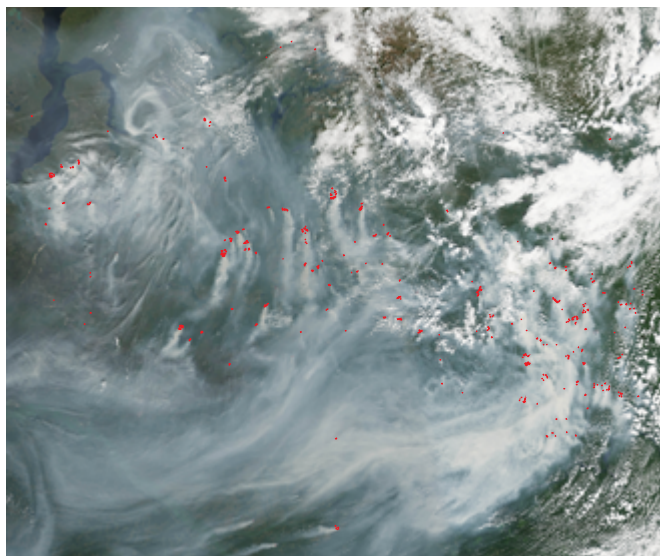
1. обеспечение значимого участия «первых наций» в процессе планирования;
2. охрану экологических систем и мест, имеющих культурную ценность, на Крайнем Севере посредством включения не менее 225 000 км² территории региона во взаимосвязанную сеть охраняемых природных территорий, определенных в планах землепользования на уровне общин;
3. поддержание биологического разнообразия, экологических процессов и функций, включая хранение и связывание углерода на Крайнем Севере;
4. обеспечение устойчивого экономического развития на благо «первых наций».

Разработку этой стратегии планировалось завершить в 2016 году, но этот процесс все еще продолжается при ведущей роли заинтересованных представителей «первых наций», которые работают в тесном контакте с Министерством природных ресурсов и лесного хозяйства провинции Онтарио. Часть общинных планов землепользования уже утверждена, часть находится в процессе разработки, а остальные либо уже осуществляются, либо к их реализации пока еще не приступили.⁷⁰ Несмотря на достигнутый прогресс, сохраняется неопределенность в отношении путей достижения некоторых целей закона, в том числе в области государственного управления, и особенно в части накопления научных знаний. С тем чтобы разработать надлежащие политические установки и меры реагирования в области государственного управления, абсолютно необходимо обеспечить понимание того, каким образом изменение климата сказывается на процессах связывания и хранения углерода в торфяниках Крайнего Севера, а также отражается на сопутствующих экологических процессах.

Первоочередные задачи в области накопления знаний и расширения сетей взаимодействия

В отношении того, как быстро вечномерзлые торфяники будут претерпевать определенные изменения и каковы будут последствия этих изменений как на местном, так и на глобальном уровне, сохраняется значительная степень неопределенности. Для финансирования дальнейших исследований в долгосрочной перспективе и разработки работоспособных стратегий уменьшения уязвимости требуется наладить международное сотрудничество. Странам необходимо вести совместную работу по реализации ряда практически осуществимых мер, обеспечивающих признание и применение традиционных и местных знаний, способствующих взаимодействию с заинтересованными сторонами и созданию эффективных сетей наблюдения за состоянием окружающей среды.¹⁵ В то же время реализация образовательных программ и просвещение общественности в отношении рисков, вероятных последствий и возможных вариантов адаптации будут иметь ключевое значение для разработки обоснованных методов государственного управления и политики.

Хотя в настоящее время существует сеть наблюдательных станций, предоставляющих информацию об общих тенденциях изменения вечной мерзлоты, распределены они по поверхности Земли весьма неравномерно. В частности, отмечаются крупные пробелы в сети по всей центральной части канадской и среднесибирской Арктики, в Гренландии, на Крайнем Северо-Востоке России, Тибетском плато



Фотография предоставлена: NASA Earth Observatory/Jesse Allen and Joshua Stevens
Спутниковый снимок от 19 июля 2016 года показывает плотные клубы дыма над вечномерзлыми торфяниками северных районов центральной части России. Красные разграничительные линии указывают на высокие температуры поверхностного слоя, вероятно, вызванные торфяными пожарами.

и в субарктическом регионе.^{30,63} Своевременная оценка состояния вечной мерзлоты в мировом масштабе потребует расширения существующих исследовательских сетей для формирования более всеобъемлющей сети мониторинга. В идеале эту расширенную сеть следует организовать таким образом, чтобы она была удобной в использовании для всех заинтересованных сторон — от ученых-климатологов до широкой общественности и основанной на использовании результатов стандартизированных измерений и легкодоступных баз данных.^{15,64} Страны с обширными зонами вечной мерзлоты только выиграют от подготовки планов адаптации, основанных на результатах оценки потенциальных рисков и включающих стратегии смягчения последствий в том, что касается ущерба и издержек, связанных с деградацией вечной мерзлоты.⁶⁴

В качестве объектов повышенного внимания вечномерзлые торфяники, хранящие и высвобождающие углерод, представляют собой особую, весьма разнообразную и динамично меняющуюся среду, которая охватывает сложные взаимосвязи между углеродом, накопленным в почве, гидрологией, вечной мерзлотой, растительностью и деятельностью человека. Основные пробелы в знаниях обусловлены ограниченным пониманием того, как эти процессы взаимосвязаны, а также в нехватке современных исследований и моделей. Требуется провести дополнительные исследования для определения точного месторасположения вечномерзлых торфяников, причин их изменения и потенциала высвобождения углерода. Необходимо, чтобы климатические модели включали прогноз выбросов углерода в атмосферу в результате мобилизации углерода, связанного в вечной мерзлоте. Чтобы лучше описать реакцию вечномерзлых торфяников на изменение климата и реакцию климата на изменение торфяников,



Видеоматериал: Восстановление торфяников в России в целях предотвращения пожаров и смягчения последствий изменения климата



Фотография: Пожар в зарослях карликовой березы в тундре в Республике Коми, Россия
Видеоматериал доступен по адресу:
https://www.youtube.com/watch?v=QZ5qu_nPHYM

Фотография предоставлена:
Hans Joosten
© Wetlands International

▶ **Видеоматериал: Торфяники — регулирование климата и биоразнообразие**



Плоские палсы в Республике Коми, Россия
Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=ZcxZ9gvNfSU>

Фотография предоставлена:
Hans Joosten
© Naturstyrelsen

крайне важно перейти к проведению междисциплинарных исследований. Это потребует осуществления интеграции полевых наблюдений и ретроспективных, или палеоэкологических, исследований, дистанционного зондирования и динамического моделирования.^{22,30} Физическая и многокомпонентность вечномерзлых торфяников и значительные потенциальные риски их деградации и разрушения также требуют принятия в большей степени целостного подхода к планированию землепользования и управлению им, что, в свою очередь, предполагает необходимость углубления комплексных знаний, которыми располагают специалисты по вопросам планирования и директивные органы.

В Арктике уже наблюдаются существенные изменения. Даже при условии полного осуществления Парижского соглашения в соответствии с Рамочной конвенцией Организации Объединенных Наций об изменении климата пока еще сохраняется вероятность того, что к концу нынешнего столетия окружающая среда Арктики будет совершенно иной, чем сегодня.¹⁵ Почти неизбежное ускорение воздействия усиливает настоятельную необходимость в местных и региональных стратегиях адаптации, нацеленных на эти северные экосистемы с высокой плотностью углерода. Осмотрительный подход к управлению вечномерзлыми торфяниками будет иметь ключевое значение для ограничения выбросов парниковых газов в атмосферу, уменьшения уязвимости человека и окружающей среды, а также для создания долгосрочной устойчивости к изменению климата.



Фотография предоставлена: Franziska Tanneberger
Вечномерзлая топь с палсами близ Ноябрьска, Западная Сибирь, Россия

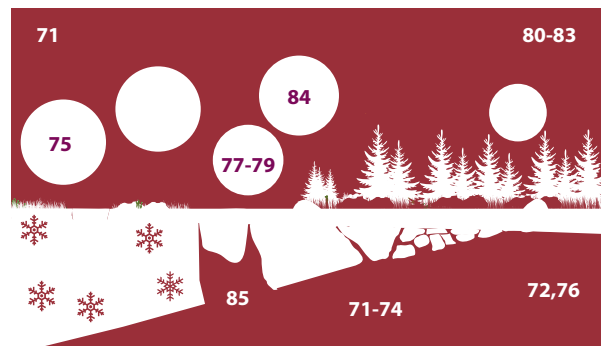
Список использованной литературы

- Leifeld, J. and Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1071. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03406-6>
- Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23(2), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C.L. et al. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11, 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
- Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J. et al. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Strauss, J., Schirmer, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C. et al. (2017) Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews* 172, 75–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007>
- Brown, J., Ferrians, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E. (2002). *Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions, Version 2*. Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center. https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html
- Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D., Hugelius, G., Kuhry, P. et al. (2016). Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nature Communications* 7, 13043. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Brown, R.J.E. (1960). The distribution of permafrost and its relation to air temperature in Canada and the USSR. *Arctic* 13(3), 163–177. <http://pubs.aina.ucalgary.ca/arctic/Arctic13-3-163.pdf>
- Gravis, G.F., Melnikov, E.S., Guo, D., Li, S., Li, S., Tong, B. et al. (2003). Principles of classification and mapping of permafrost in Central Asia. *8th International Conference on Permafrost 2003*. Arenson, L.U., Springman, S.M. and Phillips, M. (eds.). AA Balkema Publishers. 297–302
- Overland, J.E., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.J., Walsh, J.E., Wang, M. et al. (2017). Surface Air Temperature. Arctic Report Card: Update for 2017. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/Surface-Air-Temperature>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Park, H., Kim, Y. and Kimball, J.S. (2016). Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment* 175, 349–358. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.rse.2015.12.046>
- Minayeva, T., Sirin, A., Kershaw, P. and Bragg, O. (2018). Arctic peatlands. In *The Wetland Book II: Distribution, Description, and Conservation*. by Finlayson, C.M., Milton, G.R., Prentice, R.C. and Davidson, N.C. (eds.). Dordrecht, NL: Springer 1–15. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_109
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017a). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Snow-Water-Ice-and-Permafrost-in-the-Arctic-SWIPA-2017/1610>
- Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Bowden, W.R., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.G. et al. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climate Change* 119(2), 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
- Koven, C.D., Schuur, E.A.G., Schädel, C., Bohn, T.J., Burke, E.J., Chen, G. et al. (2015). A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373, 20140423. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0423>
- Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P. et al. (2016). Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change* 6, 950–953. <https://www.nature.com/articles/nclimate3054>
- Walter Anthony, K., Schneider von Deimling, T., Nitze, I., Frolking, S., Emond, A., Daanen, R. et al. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications* 9(1), 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
- Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A.D., Romanovsky, V.E. and Schuur, E.A.G. (2016). Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters* 11, 040201. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/040201>
- Shur, Y.L. and Jorgenson, M.T. (2007). Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
- Swindles, G.T., Morris, P.J., Mullan, D., Watson, E.J., Turner, E., Roland, T.P. et al. (2015). The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Nature Scientific Reports* 5, 17951. <https://doi.org/10.1038/srep17951>
- Gao, Y. and Couwenberg, J. (2015). Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady long-term rates in spite of shifts between dry and wet conditions. *Global Change Biology* 21(2), 803–815. <https://doi.org/10.1111/gcb.12742>
- Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M. and Christensen, T.R. (2003). The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9(8), 1185–1192. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00655.x>
- Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, D.H., Evans, R.J. and Scott, K.D. (2007). The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13(9), 1922–1934. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01381.x>
- De Klerk, P., Donner, N., Karpov, N. S., Minke, M. & Joosten, H. 2011. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca. 1250 years. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3013–3031. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.016>

27. 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>
28. Hartfield, G., Blunden, J. and Arndt, D.S. (eds.) (2018). State of the climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), Si–S332. <https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>
29. Baltzer, J.L., Veness, T., Chasmer, L.E., Sniderhan, A.E. and Quinton, W.L. (2014). Forests on thawing permafrost: fragmentation, edge effects, and net forest loss. *Global Change Biology* 20(3) 824–834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12349>
30. Carpino, O.A., Berg, A.A., Quinton, W.L. and Adams, J.R. (2018). Climate change and permafrost thaw-induced boreal forest loss in northwestern Canada. *Environ. Res. Lett.* 13, 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad74e>
31. Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications* 9(1), 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
32. Jones, B.M., Grosse, G., Arp, M.C., Jones, K.M., Walter, A. and Romanovsky, V.E. (2011). Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 116, G00M03. <https://doi.org/10.1029/2011JG001666>
33. Jones, M.C., Grosse, G., Jones, B.M. and Walter Anthony, K.M. (2012). Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* 117, G00M07. <https://doi.org/10.1029/2011JG001766>
34. Jones, B.M. and Arp, C.D. (2015). Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in Northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes* 26, 119–128. <https://doi.org/10.1002/ppp.1842>
35. Van Huissteden, J., Berrittella, C., Parmentier, F.J.W., Mi, Y., Maximov, T.C. and Dolman, A.J. (2011). Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change* 1, 119–123. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1101>
36. Roach, J., Griffith, B., Verbyla, D. and Jones, J. (2011). Mechanisms influencing changes in lake area in the Alaskan boreal forest. *Global Change Biology* 17, 2567–2583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02446.x>
37. Jepsen, S.M., Voss, C.I., Walvoord, M.A., Minsley, B.J. and Rover, J. (2013). Linkages between lake shrinkage/expansion and sublacustrine permafrost distribution determined from remote sensing of interior Alaska, USA. *Geophysical Research Letters* 40, 882–887. <https://doi.org/10.1002/grl.50187>
38. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* 15(3), 549–560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
39. Jones, B.M., Kolden, C.A., Jandt, R., Abatzoglou, J.T., Urban, F. and Arp, C.D. (2009). Fire behavior, weather, and burn severity of the 2007 Anaktuvuk river tundra fire, North Slope, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41, 309–316. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-41.3.309>
40. Hu, F.S., Higuera, P.E., Walsh, J.E., Chapman, W.L., Duffy, P.A., Brubaker, L.B. et al. (2010). Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, G04002. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001270>
41. Hu, F.S., Higuera, P.E., Duffy, P.A., Chipman, M.L., Rocha, A.V., Young, A.M. et al. (2015). Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(7), 369–377. <https://doi.org/10.1890/150063>
42. Mack, M.C., Bret-Harte, M.S., Hollingsworth, T.N., Jandt, R.R., Schuur, E.A.G., Shaver, G.R. et al. (2011). Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire. *Nature* 475, 489–492. <https://www.nature.com/articles/nature10283>
43. Kelly, R., Chipman, M.L., Higuera, P.E., Stefanova, I., Brubaker, L.B. and Hu, F.S. (2013). Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, 13055–13060. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305069110>
44. Rupp, T.S., Duffy, P., Leonawicz, M., Lindgren, M., Breen, A., Kurkowski, T. et al. (2016). Climate scenarios, land cover, and wildland fire. In Zhu, Z. and McGuire, A.D. (eds.), *Baseline and projected future carbon storage and greenhouse-gas fluxes in ecosystems of Alaska*. USGS Professional Paper 1826, 17–52
45. Bret-Harte, M.S., Mack, M.C., Shaver, G.R., Huebner, D.C., Johnston, M., Mojica, C.A. et al. (2013). The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20120490. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0490>
46. Arctic Climate Impact Assessment (2005). *Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
47. Riley, W.J., Subin, Z.M., Lawrence, D.M., Swenson, S.C., Torn, M.S., Meng, L. et al. (2011). Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences* 8, 1925–1953. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>
48. Gao, X., Schlosser, C.A., Sokolov, A., Walter Anthony, K., Zhuang, Q. and Kicklighter, D. (2013). Permafrost degradation and methane: low risk of biogeochemical climate-warming feedback. *Environmental Research Letters* 8(3), 035014. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035014>
49. Schneider von Deimling, T., Grosse, G., Strauss, J., Schirmermeister, L., Morgenstern, A., Schaphoff, S. et al. (2015). Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12(11), 3469–3488. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3469-2015>
50. Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A.D., Camilli, P., Tarnocai, C. et al. (2011). Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research* 116, G00K06. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
51. Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Khrestalev, L.N., Ladanyi, B. et al. (2005). Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In *ACIA: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 908–944.
52. Walker, D.A., Reynolds, M.K., Buchhorn, M. and Peirce, J.L. (eds.) (2014). *Landscapes and permafrost changes in the Prudhoe Bay Oilfield, Alaska*. Alaska Geobotany Center Publication AGC 14-01. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks. https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014_agc14-01.pdf

53. Vlassova, T. (2002). Human impacts on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio Special Report*, 12, 30–36.
54. Instanes, A. (2016). Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia. *Cold Regions Science and Technology* 131, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.004>
55. Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Swales, T.B. and Kokorev, V.A. (2017). Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections. *Geographical Review* 107, 125–142. <https://doi.org/10.1111/gere.12214>
56. Jorgenson, T., Shur, Y.L. and Osterkamp, T.E. (2008). Thermokarst in Alaska. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost* 1, 869–876. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks
57. Kokelj, S.V. and Jorgenson, M.T. (2013). Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24, 108–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
58. Jorgenson, M.T., Racine, C.H., Walters, J.C. and Osterkamp, T.E. (2001). Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change* 48, 551–579. <https://doi.org/10.1023/A:100566742>
59. Halsey, L.A., Vitt, D.H. and Zoltai, S.C. (1995). Initiation and expansion of peatlands in Alberta, Canada. *Climate, landscape and vegetation change in the Canadian Prairie Provinces Proceedings* 45–53. Edmonton, Alberta: Canadian Forestry Service. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/18992.pdf>
60. Jorgenson, M.T., Shur, Y.L. and Walker, H.J. (1998). Evolution of a permafrost-dominated landscape on the Colville River Delta, northern Alaska. *Proceedings of Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 523–529.
61. Fortier, D. and Allard, M. (2004). Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(8), 997–1012. <https://doi.org/10.1139/e04-031>
62. Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M. and Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 31, L18208. <https://doi.org/10.1029/2004GL020358>
63. Metcalfe, D.B., Hermans, T.D.G., Ahlstrand, J., Becker, M., Berggren, M., Björk, R. G. et al. (2018). Patchy field sampling biases understanding of climate change impacts across the Arctic. *Nature Ecology & Evolution* 2, 1443–1448. <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0612-5>
64. United Nations Environment Programme (2012). *Policy implications of warming permafrost*. UNEP : Nairobi. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8533>
65. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017b) *Adaptation actions for a changing Arctic: Perspectives from the Barents area*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604>
66. Chetkiewicz, C. and Lintner, A. (2014). *Getting it right in Ontario's Far North: the need for a regional strategic environmental assessment in the Ring of Fire [Wawagajing]*. Canada: Wildlife Conservation Society Canada and Ecojustice Canada. https://www.wcscanada.org/Portals/96/Documents/RSEA_Report_WCSCanada_Ecojustice_FINAL.pdf
67. Koivuova, T. (2016). Arctic resources: Exploitation of natural resources in the Arctic from the perspective of international law. In *Research Handbooks on International Law and Natural Resources*. Morgera, E. and Kulovesi, K. (eds.) Cheltenham/Northampton: Edward Elgar Publishing. Chapter 17. 349–366. <https://www.elgaronline.com/view/9781783478323.00031.xml>
68. McLaughlin, J.W. and Webster, K. (2013). *Effects of a changing climate on peatlands in permafrost zones: a literature review and application to Ontario's Far North*. Climate Change Research Report CCCR-34. Canada: Ontario Ministry of Natural Resources. <http://www.ontla.on.ca/library/repository/mon/27008/323518.pdf>
69. Legislative Assembly of Ontario (2010). Ontario House Bill 191 2010. An Act with respect to land use planning and protection in the Far North. Ontario. <https://www.ola.org/en/legislative-business/bills/parliament-39/session-2/bill-191>
70. Government of Ontario (2018). Land use planning process in the Far North. Ontario. <https://www.ontario.ca/page/land-use-planning-process-far-north#section-1>

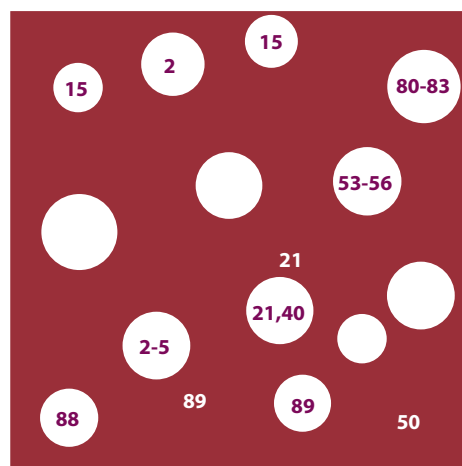
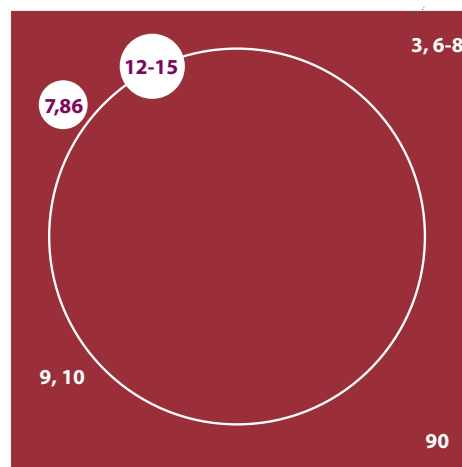
Список использованных графических материалов



71. Washburn, A.L. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. London: Edward Arnold.
72. Kujala, K., Seppälä, M. and Holappa, T. (2008). Physical properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology* 52, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.002>
73. Vasil'chuk, Y.K. (2013). Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(1), 82–93. <https://doi.org/10.1002/ppp.1764>
74. Harris, S.A., Brouchkov, A. and Cheng, G. (2018). *Geocryology: Characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms*. Leiden, NL: CRC Press/Balkema.
75. Burn, C.R. (1998). The response (1958–1997) of permafrost and near-surface ground temperatures to forest fire, Takhini River valley, southern Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(2), 184–199. <https://doi.org/10.1139/cjes-35-2-184>
76. Routh, J., Hugelius, G., Kuhry, P., Filley, T., Kaislahti, P., Becher, M. et al. (2014). Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European

Russian Arctic. *Chemical Geology* 368, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.022>

77. Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M. and Cornelissen, H.C. (2013). Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. *Functional Ecology* 27, 1442–1454. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127>
78. Porada, P., Ekici, A. and Beer, C. (2016). Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. *Cryosphere* 10, 2291–2315. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2291-2016>
79. Park, H., Launiainen, S., Konstantinov, P.Y., Iijima, Y. and Fedorov, A.N. (2018). Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
80. Chapin III, F., Sturm, M., Serreze, M., McFadden, J., Key, J., Lloyd, A. et al. (2005). Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310(5748), 657–660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
81. Blok, D., Heijmans, M.P.D., Schaepman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C. and Berendse, F. (2010). Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Global Change Biology* 16(4), 1296–1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x>
82. Briggs, M.A., Walvoord, M.A., McKenzie, J.M., Voss, C.I., Day-Lewis, F. D. and Lane, J.W. (2014). New permafrost is forming around shrinking Arctic lakes, but will it last? *Geophysical Research Letters* 41(5), 1585–1592. <https://doi.org/10.1002/2014GL059251>
83. Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Peregon, A. et al. (2017). Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0). *Geoscientific Model Development* 10, 4693–4722. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4693-2017>
84. Nauta, A.L., Heijmans, M.M.P.D., Blok, D., Limpens, J., Elberling, B., Gallagher, A. et al. (2015). Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5, 67–70. <https://www.nature.com/articles/nclimate2446>
85. Johansson, M., Christensen, T.R., Åkerman, H.J., and Callaghan, T.V. (2006). What determines the current presence or absence of permafrost in the Torneträsk region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? *Ambio* 35, 190–197. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[190:WDTCP0\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[190:WDTCP0]2.0.CO;2)
86. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F. and Armstrong, R.L. (2003). Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. In Phillips, M., Springman, S.M. and Arenson, L.U. (eds), *Permafrost, Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, 21–25 July 2003, Volume 2.
87. Joosten, H. and Couwenberg, J. (2008) Peatlands and Carbon. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. (eds.) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 99–117. http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf



88. Abbott, B.W., Jones, J.B., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. III, Bowden, W.B., Bret-Harte, M.S., Epstein, H.E., et al. (2016) Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 11: 034014. doi: 10.1088/1748-9326/11/3/034014
89. Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziec, J. D., Gusmeroli, A., et al. (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. *Geophysical Research Letters*, 45, 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
90. Brown, J., O. Ferriani, J. A. Heginbottom, and E. Melnikov. 2002. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/nsidc.org/data/GGD318/versions/2>



Фотография предоставлена: oticki / Shutterstock.com

Фиксация азота: от циклического загрязнения азотом к экономике, обеспечивающей рециркуляцию азота

Глобальная проблема азота

В Ежегоднике ЮНЕП 2014 года особое внимание было уделено значению избыточных количеств химически активного азота в окружающей среде.¹ Содержащиеся в этой публикации выводы вызывают тревогу. Это объясняется не только масштабами и комплексным характером загрязнения окружающей среды азотом, но и тем, что в деле его сокращения достигнут столь незначительный прогресс. Лишь небольшая часть работоспособных технических решений начала применяться в более широких масштабах, при этом мир продолжает заниматься деятельностью, приводящей к загрязнению азотом, что в значительной степени способствует снижению качества воздуха, ухудшению состояния наземной и водной среды, усугублению последствий изменения климата и истощению озонового слоя.²⁻¹⁰ Эти негативные последствия препятствуют прогрессу в достижении Целей устойчивого развития, поскольку они сказываются на здоровье человека, управлении ресурсами, источниках средств к существованию и экономике различных стран.¹¹⁻¹⁵ И все же

признаки надежды есть. За последние четыре года в подходах к регулированию загрязнения окружающей среды азотом отмечаются определенные изменения. Они включают в себя новое мышление как в сфере потребления, так и в области производства, позволяющее предпринять реальные шаги, с тем чтобы решить проблему азота.¹⁶⁻²⁴

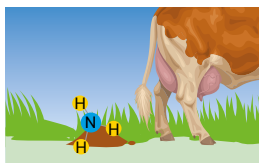
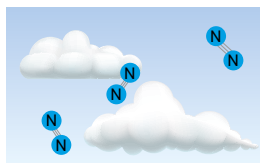
В атмосфере Земли азот присутствует в огромных количествах. В форме молекулы N_2 азот безвреден и составляет 78 процентов объема воздуха, вдыхаемого человеком. Два атома азота удерживаются вместе сильной тройной связью ($N \equiv N$), что делает этот газ чрезвычайно стабильным и химически неактивным. Наша планета извлекает из этого пользу, поскольку N_2 создает безопасную воздушную среду, в которой жизнь может процветать, избегая огнеопасных последствий чрезмерной насыщенности кислородом. С экологической точки зрения интерес к азоту сосредоточен на преобразовании N_2 в другие химически активные формы. Для простоты ученые называют все другие формы азота «фиксированным» или «химически активным» азотом (N_f).^{11,25}

Существует много типов N_2 , обладающих различными свойствами — как полезными, так и вредными, — и именно в силу этого возникают осложнения. Химически активный азот абсолютно необходим для всех живых организмов, обитающих на Земле. Например, аммиак (NH_3) является основной аминокислот, белков, ферментов и ДНК и, таким образом, занимает центральное место в метаболизме всех форм жизни. Аналогичным образом оксид азота (NO) действует в качестве одного из ключевых биологических сигнальных соединений, в то время как аммоний (NH_4^+) и нитрат азота (NO_3^-) являются основными питательными формами азота, необходимыми для роста растений. Следует отметить, что основной ценностью соединений N_2 является то, что они помогают производить пищу и корма для животных. Используя процесс Габера-Боша, обеспечивающий искусственную «фиксацию» азота, с целью поддержания растущего населения мира человечество значительно увеличило производство таких удобрений, как аммиак, мочевины и нитраты.²⁶ Одновременно люди получают пользу от естественной биологической фиксации N_2 в результате его преобразования в N_2 специальными бактериями, обитающими в почве на корнях бобовых сельскохозяйственных культур.

Этот полезный результат следует учитывать при расчете значительных потерь аммиака, нитратов, оксида азота (NO),

закиси азота (N_2O) и многих других форм N_2 , которые являются загрязнителями, оказывающими разнообразное негативное воздействие на окружающую среду. Эти воздействия могут возникать сразу после внесения удобрений, в то время как навоз животных, экскременты человека и другие органические отходы также вызывают значительные потери N_2 в окружающую среду. Хотя считается, что доля N_2 , потерянная в окружающей среде в результате биологической фиксации азота, меньше, чем вследствие применения многих удобрений на основе экскрементов животных и людей, свой вклад в загрязнение окружающей среды различными формами N_2 вносят оба источника. Химически активный азот также образуется как побочный продукт деятельности человека. Например, при сжигании ископаемых видов топлива и биомассы высвобождаются NO и NO_2 , которые в совокупности называются NO_x . Хотя в целях сокращения выбросов NO_x в атмосферу на транспорте и в энергетике предпринимаются значительные усилия, в быстро развивающихся странах мира объемы этих выбросов по-прежнему увеличиваются.^{6,12} В целом люди производят своеобразный коктейль из различных форм химически активного азота, который создает угрозу здоровью, климату и экосистемам, что переводит загрязнение азотом в разряд самых острых проблем защиты окружающей среды, стоящих перед человечеством. Однако за пределами научного сообщества масштаб этой проблемы преимущественно замалчивается и не признается.

Различные формы азота в окружающей среде



Молекулярный (N_2)

Источник
 N_2 составляет 78% воздуха, которым мы дышим.

Полезность
 N_2 обеспечивает стабильность атмосферы, делая ее пригодной для жизни на Земле. Благодаря азоту небо выглядит голубым.

Последствия
 N_2 безвреден и химически неактивен.

Аммиак (NH_3)

Источник
Навоз, моча, удобрения и сжигание биомассы.

Полезность
 NH_3 является основой аминокислот, белков и ферментов. Аммиак широко используется в качестве удобрения.

Последствия
 NH_3 вызывает эвтрофикацию и негативно сказывается на биоразнообразии. Аммиак образует в воздухе твердые частицы, которые негативно сказываются на здоровье.

Оксид азота (NO) и диоксид азота (NO_2)

Источник
Сжигание в транспортном, промышленном и энергетическом секторах. В своей совокупности NO и NO_2 известны как NO_x .

Полезность
NO является жизненно необходимым компонентом с точки зрения физиологии человека. NO_2 , насколько известно, не приносит никакой пользы.

Последствия
NO и NO_2 (или NO_x) являются основными загрязнителями воздуха, вызывающими болезни сердца и дыхательных путей.

Нитрат (NO_3^-)

Источник
Сточные воды, сельское хозяйство и окисление NO_x .

Полезность
Широко используется в удобрениях и взрывчатых веществах.

Последствия
Нитраты образуют твердые частицы в воздухе и негативно сказываются на здоровье человека. В воде нитраты вызывают эвтрофикацию.

Закись азота (N_2O)

Источник
Сельское хозяйство, промышленность и сжигание.

Полезность
Используется как компонент различных видов ракетного топлива и в медицине как ингаляционный анестетик («веселящий газ»).

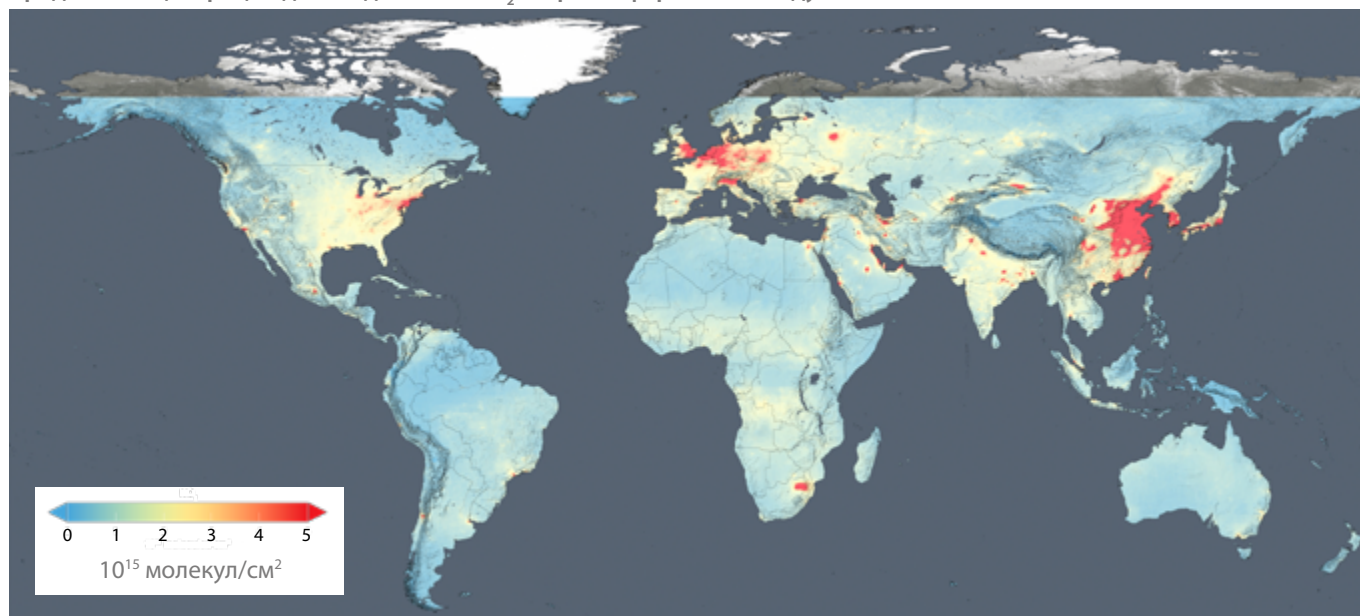
Последствия
 N_2O является парниковым газом — в 300 раз более мощным, чем CO_2 . Закись азота также приводит к истощению стратосферного озонового слоя.

Общеизвестные и предполагаемые свойства азота

Как круговорот соединений азота в природе, так и их воздействие на человека хорошо документированы.^{4,12,27,28} Но все же, если сравнивать уровень внимания, который уделяется роли углерода в изменении климата и проблемам круговорота азота, следует признать, что общественного обсуждения необходимости принятия мер в отношении азота практически не ведется. Повышенные концентрации соединений N_x в атмосфере над крупными городами и над сельскохозяйственными районами поддаются количественному измерению, например, можно измерить уровень NO_x , NH_3 и тонкодисперсных твердых частиц ($TC_{2.5}$). Повышенные концентрации NO_3^- в грунтовых водах сельскохозяйственных районов в отдельных регионах мира и в реках ниже по течению от крупных городов с невысоким уровнем очистки сточных вод или вообще без нее в равной степени поддаются количественной оценке. Концентрации парникового газа N_2O в атмосфере нарастают все более быстрыми темпами. Абсолютно ясно, что антропогенные факторы оказывают значительное влияние на круговорот азота в природе и порождают множество форм загрязнения окружающей среды и воздействия на нее. Тем самым N_x становится одним из ключевых загрязнителей окружающей среды, в отношении которого предстоит принимать меры как на местах, так и в глобальном масштабе.²²

В ходе проведения Европейской оценки по азоту было выявлено пять основных областей, подверженных угрозе загрязнения окружающей среды азотом: качество воды, качество воздуха, баланс парниковых газов, состояние экосистем и биоразнообразие, и качество почвы.⁴

Средняя концентрация диоксида азота (NO_2) в тропосфере в 2014 году



Фотография предоставлена: NASA Goddard Space Flight Center

NO_2 — это газ, выбрасываемый главным образом автомобилями, электростанциями и промышленными предприятиями. NO_2 и другие NO_x вступают в реакцию с другими загрязнителями воздуха, образуя вредный приземный озон, вызывая кислотные дожди и формируя твердые частицы.

В этом докладе подчеркивалось, что загрязнение окружающей среды азотом само по себе не является новой проблемой, но что регулирование выбросов азота должно стать составной частью решения большого числа существующих экологических проблем. Что касается производства продовольствия, то в мировом масштабе азот используется крайне неэффективно.^{20,29} С точки зрения продовольственной цепочки в целом только порядка 20 процентов N_x , используемого в сельскохозяйственном производстве, попадает в продукты питания человека.^{11,17} Это означает, что вызывающие тревогу 80 процентов тратятся впустую в виде загрязнения и попадания N_2 в окружающую среду, что свидетельствует о том, что загрязнение окружающей среды N_x представляет собой массовую потерю ценных ресурсов.

Хотя в прошлом усилия были направлены на то, чтобы решить вопросы, связанные с различными формами N_x , по отдельности, их рассмотрение в совокупности имеет ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет провести комплексное рассмотрение вопросов возникающего синергетического эффекта и возможность достижения компромиссов, основанных на балансе между преимуществами N_x и негативным воздействием различных видов загрязнения N_x . Во-вторых, и это не менее важно, такой подход побуждает к проведению количественной оценки общественных издержек по всему комплексу последствий загрязнения азотом, с тем чтобы создать информационную основу политических решений и общественного мнения.^{13,30} Проведение оценки затрат может способствовать определению направленности политических мер по смягчению воздействия, однако об истинной цене загрязнения



Видеоматериал: Спасение Великих озер от токсичных водорослей



Фотография предоставлена: Tom Archer / Michigan Sea Grant
(www.miseagrant.umich.edu)

© PBS NewsHour

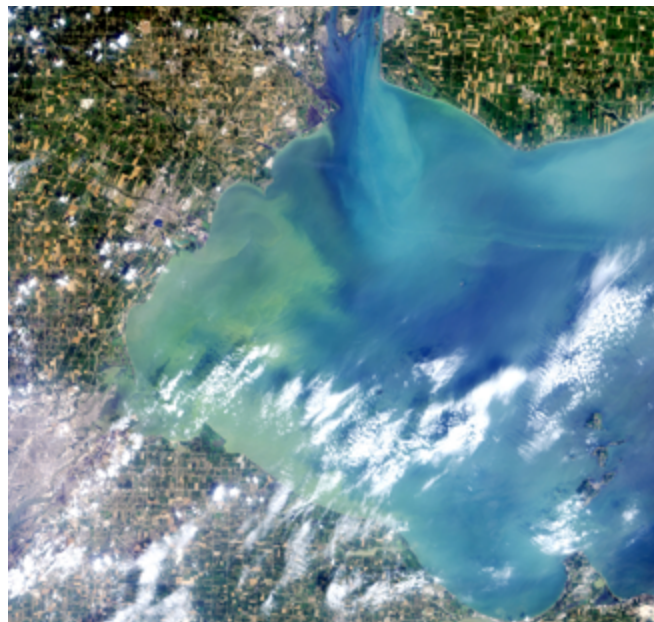
Цветение водорослей близ острова Пели на юго-востоке озера Эри

Видеоматериал доступен по адресу:

<https://www.youtube.com/watch?v=b6JzL4NG26k>

окружающей среды N_f можно только догадываться, поскольку факторы воздействия, как правило, являются принципиально «несоизмеримыми», то есть универсальную меру найти сложно. Имеющиеся оценки, основанные на готовности людей снижать риски загрязнения окружающей среды N_f или оценки затрат на поддержание здоровья экосистем и медицинские услуги тем не менее являются информативными и указывают на то, что в мировом масштабе эти затраты составляют от 340 млрд долл. США до 3,4 трлн долл. США в год.¹¹

Однако куда более простой расчет может оказаться даже более информативным. В мировом масштабе порядка 200 миллионов тонн ресурсов N_f становятся отходами или теряются в окружающую среду ежегодно в форме N_2 и N_2 .^{11,28} Если умножить эту величину на номинальную цену удобрений, эквивалентную 1 долл. США за 1 кг N_f , то общая сумма потерь денежных средств составит около 200 млрд долл. США в год. Это является мощным стимулом к действию. Такая идея актуальна и для районов со слишком низкими концентрациями N_f , таких как Африка к югу от Сахары, где сокращение масштабов загрязнения окружающей среды N_f помогло бы повысить эффективность использования ограниченного числа имеющихся источников N_f в обеспечении производства продовольствия.³¹ Преобразование соединений N_f обратно в N_2 (так называемая «денитрификация») не обеспечивает безопасного способа избежать загрязнения окружающей среды N_f . Скорее, ситуация указывает на необходимость получения новых исходных данных по N_f . Действительно, чтобы повысить эффективность использования азота (ЭИА) в масштабах всей экономики, все потери N_2 и N_f необходимо сократить.



Фотография предоставлена: Jeff Schmaltz / NASA Goddard Space Flight Center

Цветение водорослей (отмечено молочно-зеленым цветом) на западе озера Эри между Канадой и Соединенными Штатами Америки 3 августа 2014 года. Частое цветение водорослей на озере Эри вызвано азотной и фосфорной нагрузкой, связанной с попаданием в речной сток удобрений и навоза с сельскохозяйственных угодий, сбросом городских сточных вод и атмосферными осадками.



Видеоматериал: Антропогенное воздействие на качество воздуха в мировом масштабе



Фотография предоставлена: Doin / Shutterstock.com

Видеоматериал доступен по адресу:

https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=aMnDoXuTGS4

© NASA Goddard
Space Flight Center

Сжигание ископаемых видов топлива в транспортном, энергетическом и промышленном секторах



Высокотемпературное сжигание **угля**, **нефти** и **природного газа** высвобождает большое количество N_f в форме NO и NO_2 , совместно известных как NO_x

На долю **транспортного сектора** приходится более **65%** выбросов NO_x

Доля **антропогенной фиксации N_2 в N_f** по причине **сжигания ископаемых видов топлива** составляет **13%**



Производство удобрений

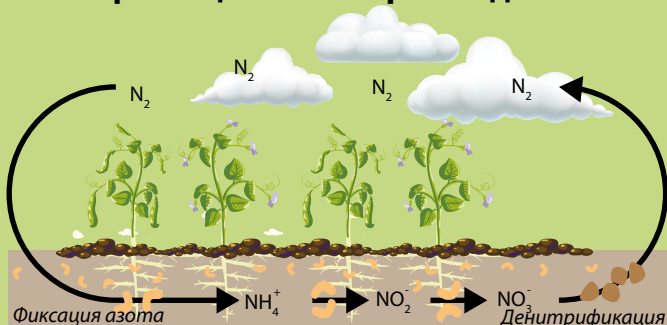
Процесс Габера-Боша был разработан более 100 лет тому назад для удовлетворения растущих потребностей в массовом промышленном производстве азотных удобрений на основе N_f и взрывчатых веществ на основе азота. Аналогично естественной фиксации азота бактериями **этот процесс обеспечивает искусственную фиксацию атмосферного N_2 в аммиаке (NH_3)**.



На **производство удобрений** приходится **63%** антропогенной фиксации N_2 в N_f

Биологическая фиксация азота при возделывании сельскохозяйственных культур

В природе N_2 может быть преобразован в N_f при ударе молнии или в результате биологической фиксации азота азотфиксирующими бактериями

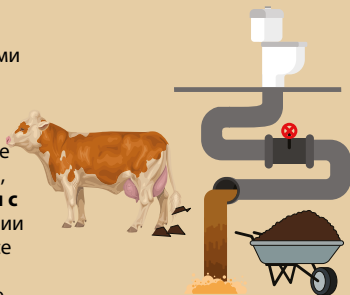


N_f можно также биологически преобразовать обратно в N_2 путем **денитрификации** анаэробными бактериями. Эти естественные процессы обеспечивают сбалансированный круговорот азота в природе, но расширение масштабов **культивирования азотфиксирующих сельскохозяйственных культур**, таких как бобовые, значительно увеличило поступления и потери N_f в окружающую среду.

На **биологическую фиксацию азота при культивировании сельскохозяйственных культур** приходится **24%** преобразования N_2 в N_f

Отходы

Помимо того, что ключевыми факторами сокращения выбросов N_f являются производство продовольствия и сжигание ископаемых видов топлива, **роль системы обращения с отходами** в предотвращении каскадного поступления все большего количества N_f в окружающую среду также имеет значение



В отличие от коммунально-бытовых стоков и сбросных вод, образования больших количеств **пищевых отходов можно избежать**

Коммунально-бытовые стоки, сбросные воды и пищевые отходы содержат белки. Около **16% белка** приходится на азот.



Наибольшие объемы потерь продовольствия и пищевых отходов приходится на **зерновые, фрукты, овощи, корнеплоды и клубнеплоды**

Каждый год около **1/3 продовольствия, производимого** во всем мире для потребления человеком, **теряется или тратится впустую**

Каскадное преобразование азота

Азот жизненно необходим для любого живого организма. Он является составной частью ДНК, аминокислот, белков, хлорофилла, ферментов, витаминов и многих других органических соединений.

N_2 имеется в изобилии, но **метаболически** он **непригоден** для использования живыми организмами, за исключением некоторых микробов. Чтобы сделать азот пригодным для использования, N_2 необходимо преобразовать в другие формы азота, то есть в **химически активный азот** N_x .

На **78%** атмосферный воздух состоит из N_2

Закись азота N_2O — это **парниковый газ**, который в 300 раз мощнее CO_2 и истощает озоновый слой

Почти **80%** антропогенных выбросов N_2O приходится на сельское хозяйство

В мировом масштабе **80%** выбросов **аммиака NH_3** приходится на деятельность человека, по большей части в результате **применения удобрений и разведения домашнего скота**

Аммиак и азотная кислота вступают в реакцию, приводящую к образованию **твердых частиц** аммиачной селитры, тем самым создавая опасность возникновения респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний

Выбросы N_x могут смешиваться с атмосферными осадками, вызывая **азотнокислые дожди**

50% азотных удобрений, вносимых в почву сельскохозяйственных угодий, в конечном итоге **загрязняют окружающую среду** или теряются в результате **денитрификации**, превращаясь в исходный N_2

Нитраты NO_3^- с сельскохозяйственных угодий могут просачиваться через почву в **грунтовые воды**, оказывая негативное воздействие на качество **запасов питьевой воды** и создавая значительный риск для **здоровья человека**

Обогащение N_x способствует **эвтрофикации**, приводя к **вредному цветению водорослей, образованию мертвых зон и утрате биоразнообразия** в пресноводной и морской среде

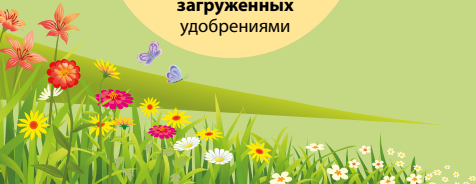
Длительное применение удобрений на основе аммония приводит к тому, что **почва становится кислой**, что оказывает негативное воздействие на возделывание сельскохозяйственных культур

Загрязнение аммиаком вызывает **эвтрофикацию**, закисление почвы и прямое токсическое воздействие на организмы, **сокращая видовое богатство и разнообразие**

Оксиды азота (NO_x) негативно сказываются на качестве воздуха в городах. Острое и хроническое воздействие NO_2 ведет к возникновению **респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний** и повышению уровня смертности. Уязвимыми к NO_2 являются дети, пожилые люди и астматики



В 2016 году в мире было использовано **105 миллионов метрических тонн** азотных удобрений, что эквивалентно **4,2 миллиона грузовиков, доверху загруженных удобрениями**



Отсутствие единой политики и решения, направленные на формирование многооборотной экономики

Политические установки в области сокращения выбросов азота так же, как научные исследования азота, отнесены к различным направлениям охраны окружающей среды и формам N_f . Факторы воздействия N_f охватывают множество областей политики, таких как борьба с загрязнением воздуха, адаптация к изменению климата, политика в отношении пресноводной и морской среды, сохранение биоразнообразия, здравоохранение и обеспечение продовольственной безопасности. Эта раздробленность широко проявляется во внутренней политике многих стран, но вместе с тем она столь же очевидна и в Целях устойчивого развития (ЦУР). Изучение ЦУР и лежащих в их основе показателей свидетельствует о том, что практически в каждом случае азот оказывает непосредственное воздействие, но почти всегда это воздействие незаметно. В настоящее время из связанных с азотом показателей разрабатывается только показатель, предлагаемый в рамках целевой задачи ЦУР 14.1 «Сохранение морских экосистем». ³² Предложения о включении ЭИА, или потерь азота, в набор показателей ЦУР пока не приняты. ^{20,33}

В компромиссных политических решениях, связанных с отдельными аспектами круговорота азота в природе, нетрудно заметить последствия деления политики на различные направления. Например, реализация политики в отношении сокращения загрязнения водных ресурсов NO_3^- в Европейском Союзе привела к полному запрету на внесение навоза на поля в зимние «закрытые периоды». Однако это привело к расширению масштабов внесения навоза весной и летом, результатом чего, в свою очередь, стало повышение пиковых концентраций аммиака в атмосфере. ³⁴ Этого сезонного эффекта удалось избежать лишь частично в нескольких странах ЕС, потребовавших, чтобы вносимый на поля навоз отличался низким уровнем выбросов NH_3 . ³⁵ Еще одним примером является рекомендация о размещении крупного рогатого скота в закрытых помещениях в целях сокращения влияющих на климат выбросов N_2O . Однако даже при наличии наилучших технических мер по ограничению таких выбросов это, как правило, приводит к увеличению выбросов NH_3 . ³⁶ Такие компромиссные решения характерны и в случае выбросов в результате сжигания топлива. Например, внедрение катализаторов для сокращения выбросов NO_x в 1990-е годы привело к увеличению выбросов N_2O и NH_3 .

Эти примеры служат иллюстрацией настоятельной необходимости объединения научных усилий и политических действий в отношении азота по всем возникшим угрозам. ^{11,30,37} Например, принятый Правительством Китая в 2015 году «План действий по обеспечению нулевого прироста внесения удобрений» направлен на предотвращение увеличения масштабов применения синтетических удобрений к 2020 году без сокращения производства продовольствия, что ограничит все формы загрязнения окружающей среды N_f . В качестве следующего шага было предложено сосредоточить внимание на устранении социально-экономических барьеров, связанных с размером фермерских хозяйств, инновациями и передачей информации. ³⁸



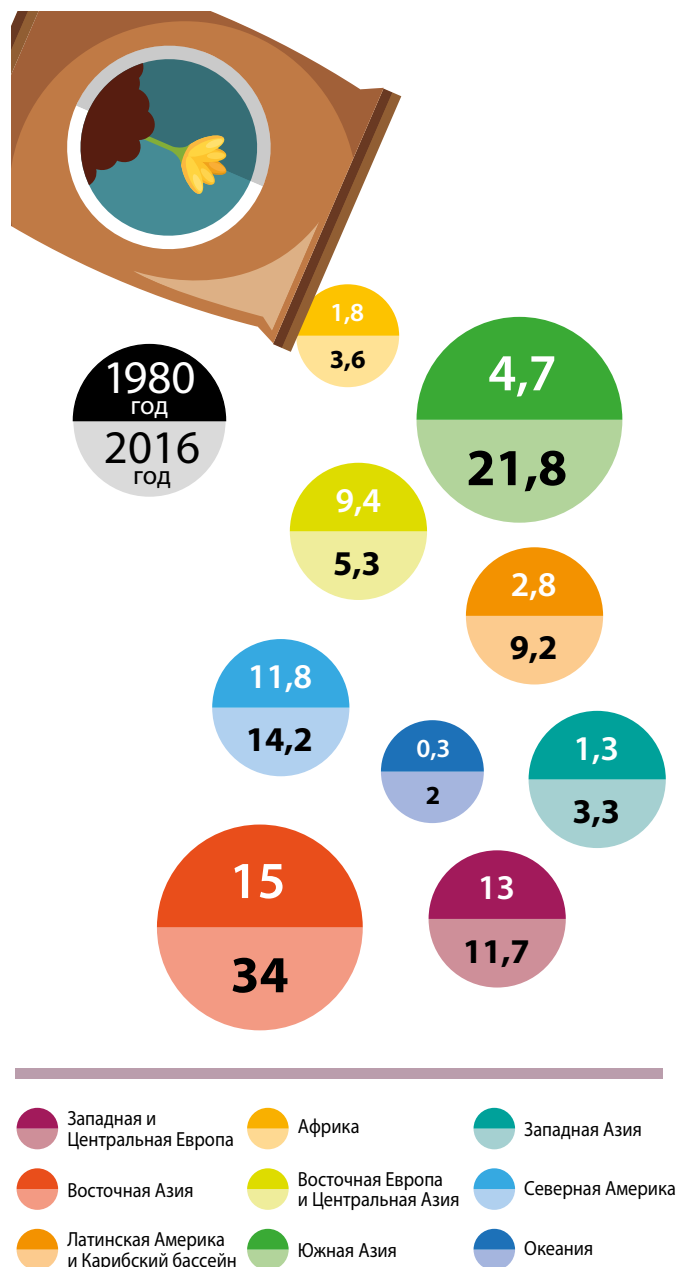
Азот, питательные вещества и многооборотная экономика

Пакет мер по формированию многооборотной экономики, принятый Европейским союзом в 2015 году, преследует цель максимально возможного повышения эффективности использования ресурсов на всех этапах цепочки создания стоимости — производства, потребления, обращения с отходами и переработки вторичного сырья. ^{42,43} В этом плане действий признается, что управление и торговля органическими удобрениями и удобрениями на основе отходов имеют ключевое значение для рекуперации и рециркуляции биогенных питательных веществ, таких как азот и фосфор, в экономике ЕС. Новые нормативно-правовые акты поощряют экологически безопасные инновационные способы производства органических удобрений с использованием биоотходов и побочных продуктов животного происхождения, таких как высушенный или компостированный навоз, а также других сельскохозяйственных отходов, доступных из внутренних источников. В настоящее время в ЕС рециркулируется и применяется в качестве удобрений лишь 5 процентов органических отходов. Создание благоприятных условий для свободного трансграничного перемещения биоудобрений приведет к формированию нового рынка и цепочки поставок вторичного сырья в рамках ЕС. Согласно оценкам в результате этого будет создано около 120 000 рабочих мест. Ожидается, что извлечение азота из биоотходов уменьшит или заменит потребность в синтетических или неорганических азотных удобрениях, производство которых сопровождается высоким уровнем выбросов углерода и энергозатрат. В то же время это будет способствовать дальнейшему снижению потерь химически активного азота в окружающую среду.

Мобилизация усилий, направленных на формирование многооборотной экономики путем обеспечения рециркуляции азота и других питательных веществ, начинается на фермах, где сокращение потерь позволяет более эффективно поставлять питательные вещества, необходимые для поддержки роста сельскохозяйственных культур. Одной из основных потребностей в этой связи является предоставление практических инструментов, которыми фермеры могли бы руководствоваться при сокращении поступления азота для учета сокращения потерь от загрязнения азотом, что достигается за счет применения методов смягчения последствий. Эти инструменты должны основываться на результатах проведения соответствующих анализов почвы, позволяющих фермерам обрести уверенность в своей способности произвести тонкую настройку процесса поступления питательных веществ.

Однако существует также огромный потенциал для расширения масштабов повторного использования азота и других питательных веществ в целях производства товаров с добавленной стоимостью, пользующихся спросом на рынке. Так же как крупные инвестиции преобразуют жизнь общества, формируя «низкоуглеродную экономику» (например, за счет все более широкого использования возобновляемых источников энергии), ценность азота предполагает возникновение значительных экономических возможностей вследствие инвестиций в «многооборотную азотную экономику».

Потребление всех видов азотных удобрений в 1980 и 2016 годах (в млн метр. тонн) в разбивке по регионам



Источник данных: Международная ассоциация производителей минеральных удобрений (<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>)

Нетрудно также спрогнозировать, что дальше последует переход от круговорота азота в сельском хозяйстве к модели многооборотной экономики, обеспечивающей рециркуляцию азота. В этом плане повышение эффективности и снижение потерь удобрений, биологической фиксации азота, мочи и навоза позволят большему количеству свежего азота достигать намеченных пищевых и биоэнергетических продуктов. В то же время переработка животноводческих и человеческих экскрементов в новые удобрения открывает возможность сбыта рециклированных удобрений на рынке.

Что касается тех случаев, когда источником выбросов NO_x является сжигание топлива, то здесь ситуация отличается коренным образом, поскольку все имеющиеся технологии, например каталитическое и некаталитическое восстановление, сосредоточены на денитрификации NO_x обратно в N_2 . И все же такой подход приводит к огромным потерям ресурсов. Если объем глобальных выбросов NO_x умножить на цену N_1 -удобрений, то в мировом масштабе этот ежегодно образующийся ресурс составит 50 млрд долл. США, что свидетельствует о необходимости разработки и внедрения технологий для восстановления NO_x до NO_3^- .^{11,39}

В Индии финансовые перспективные планы также определяют политику правительства, которое с 2016 года требует, чтобы все удобрения на основе мочевины были покрыты маслом, полученным из семян маргозы, что позволяет уменьшить как потери N_1 в окружающую среду, так и расходование финансовых средств, выделяемых в форме субсидирования несельскохозяйственных применений мочевины. Этот же принцип лежит в основе обнародованного в ноябре 2017 года призыва премьер-министра Индии к фермерам о сокращении использования удобрений в два раза к 2020 году, а также государственной поддержки натурального земледелия с нулевым балансом выбросов (НЗНБВ) в некоторых индийских штатах. Движение НЗНБВ уделяет особое внимание тому, чтобы в почву не вносились дорогостоящие удобрения и пестициды, что поможет фермерам избежать возникновения задолженности, а также будет способствовать продвижению экологически безопасных возможностей улучшения гумуса, биологического состояния почвы и повышения ее плодородия. Благодаря партнерству между банком «БНП Париба», Программой ООН по окружающей среде и Международным центром научных исследований в области агролесоводства (МЦНИАЛ) при посредстве Фонда финансирования устойчивого развития в Индии (ФФУРИ) в штате Андхра-Прадеш оказывается поддержка стремительному расширению сферы охвата движения НЗНБВ, к которому присоединяются тысячи фермеров-энтузиастов. Этот новаторский подход основан на том, что займы, предназначенные для поддержки инвестиций и расширения масштабов производства, погашаются правительством, поскольку при сокращении использования удобрений потребуется гораздо меньше субсидий на их приобретение.^{40,41}

На пути к целостному международному подходу в отношении азота

Отрадно отметить, что несколько стран на экспериментальной основе уже применяют более комплексные подходы к регулированию кругооборота азота. Например, Германия оперативно отреагировала на Европейскую оценку по азоту, разработав комплексную стратегию в этой области.^{23,44} Для многих стран трудность заключается в том, что ответственность за меры реагирования на угрозы, создаваемые азотом, распределяются между несколькими министерствами, что затрудняет координацию действий. Например, в Бразилии под сельское хозяйство по-прежнему отводятся большие территории, и проблема более эффективного устранения взаимозависимости между растениеводством и животноводством, с одной стороны, и их воздействием на окружающую среду, с другой, в явном виде не рассматривается.⁴⁵ На международном уровне трансграничное воздействие N₂ также требует принятия четкого законодательства и политических действий.

Члены Международной инициативы по азоту (МИА) уделяют значительное внимание этим проблемам. Первым шагом стало сотрудничество с Программой ООН по окружающей среде в целях выработки скоординированного подхода к научной поддержке разработки международной политики в рамках «Международной системы регулирования азота» (МСРА).

При поддержке Глобального экологического фонда и 80 организаций-партнеров участники МСРА разрабатывают руководящие указания по регулированию кругооборота азота, интеграции потоков и воздействий, оценке затрат и выгод и

Видеоматериал: Загрязнение воздуха в результате сельскохозяйственной деятельности



Фотография предоставлена: gillmar / Shutterstock.com

© European Union

Видеоматериал доступен по адресу:
https://www.youtube.com/watch?v=07P_wXTTusi

Видеоматериал: Почему удобрения влияют на окружающую среду и ваши заработки



Рисунок предоставлен: Visual Generation / Shutterstock.com

Видеоматериал доступен по адресу:

<https://www.youtube.com/watch?v=5TzzPOy1T3g>

© Environmental

Defense Fund

будущим сценариям по азоту. В рамках МСРА также организуются региональные мероприятия с участием многих стран с целью демонстрации той пользы, которую может принести целостная система регулирования кругооборота азота в природе. Одним из основных результатов этой инициативы станет первая Глобальная оценка по азоту, которую планируется опубликовать в 2022 году.

Следующая задача заключается в разработке более последовательной рамочной политической основы регулирования кругооборота азота. Необходимость ее разработки четко прослеживается во многих резолюциях Ассамблеи Организации Объединенных Наций по окружающей среде, касающихся азота: 2/6 (Парижское соглашение), 2/7 (химические вещества и отходы), 2/8 (устойчивое потребление и производство), 2/9 (пищевые отходы), 2/10 (океаны), 2/12 (коралловые рифы), 2/24 (деградация земель), 3/4 (окружающая среда и здоровье), 3/6 (почва), 3/8 (качество воздуха) и 3/10 (загрязнение воды).^{46,47} Наиболее четко это отражено в резолюции 3/8, в которой содержится призыв к правительствам «использовать синергию в результате эффективного регулирования азота для уменьшения загрязнения воздуха, морской среды и воды».

В ходе недавних дискуссий в научных и политических кругах изучался вопрос о том, как более эффективно координировать участие в политике регулирования кругооборота азота.⁴⁸ К числу возможных вариантов относятся:

Вариант 1: Разнесение проблемы кругооборота азота по различным рамочным политическим основам — нынешнее положение дел.
 Вариант 2: Придание мерам по регулированию кругооборота азота ведущей роли в рамках одного из действующих политических механизмов. Это создаст проблему с точки зрения рамок предоставленного мандата, поскольку существующие многосторонние природоохранные соглашения (МПС) затрагивают лишь часть этой проблемы.

Вариант 3: Новая международная конвенция по решению проблемы азота. В настоящее время такой подход мало кто поддерживает.

Вариант 4: «Межконвенционный координационный механизм по азоту», способный стать межправительственным форумом для межучрежденческого сотрудничества по азоту, возможно, в рамках мандата Ассамблеи Организации Объединенных Наций по окружающей среде.

В настоящее время координационный механизм отсутствует, что ограничивает возможности участников действующих МПС учиться друг у друга, хотя требовать, чтобы МКМА вел работу с участниками многих МПС по отдельности, также было бы неэффективно. Координационный механизм может служить средством активного привлечения государств-членов и участников соответствующих МПС. Основные группы и заинтересованные стороны Программы ООН по окружающей среде уже оказывают содействие вовлечению деловых кругов и гражданского общества в эту работу. Следует отметить, что Вариант 4 по-прежнему остается лишь одним из вариантов, но не более того. Именно национальным правительствам надлежит обсудить, какой из подходов является наиболее гибким, эффективным и экономичным.

Тем не менее это обсуждение указывает на еще одно преимущество. Становится все более очевидным, что мировое сообщество нуждается в целостном подходе к научным исследованиям и политике в области регулирования круговорота азота в природе. Во-первых, перспектива многосекторального подхода, основанного на использовании многих источников, позволяет учитывать синергетический эффект и возможные компромиссные решения. Это принесло бы пользу сельскому хозяйству и промышленности, обеспечив более согласованную основу для принятия деловых решений. Во-вторых, целостный подход закладывает фундамент для развития в перспективе многооборотной экономики, что имеет жизненно важное значение для стимулирования преобразований. Кроме того, такой подход к проблеме азота становится иллюстрацией того, как будущая политика в области охраны окружающей среды могла бы обеспечить более эффективную координацию действий по различным направлениям. По мере разработки Программой ООН по окружающей среде своей стратегии превращения Земли в «планету, свободную от загрязнения», извлеченные уроки, вероятно, будут приобретать все большее значение и для решения комплекса других взаимосвязанных проблем загрязнения.

Межконвенционный координационный механизм по азоту



Видеоматериал:
 Проблема сельскохозяйственного аммиака



Фотография предоставлена: Mark Sutton
 Видеоматериал доступен по адресу:
<https://www.youtube.com/watch?v=y0IGSmOWyAs>

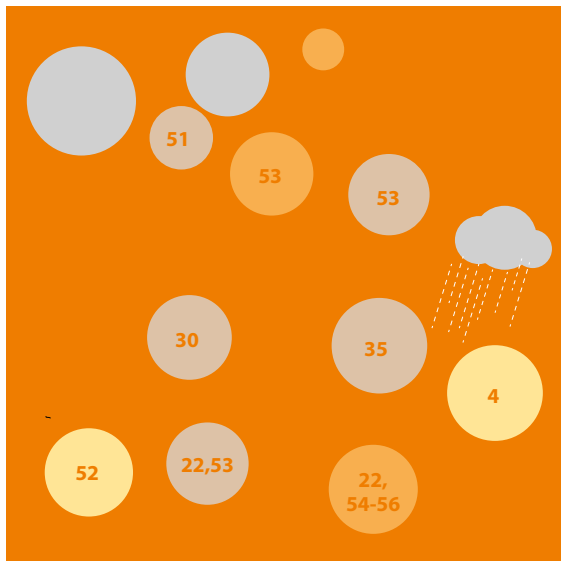
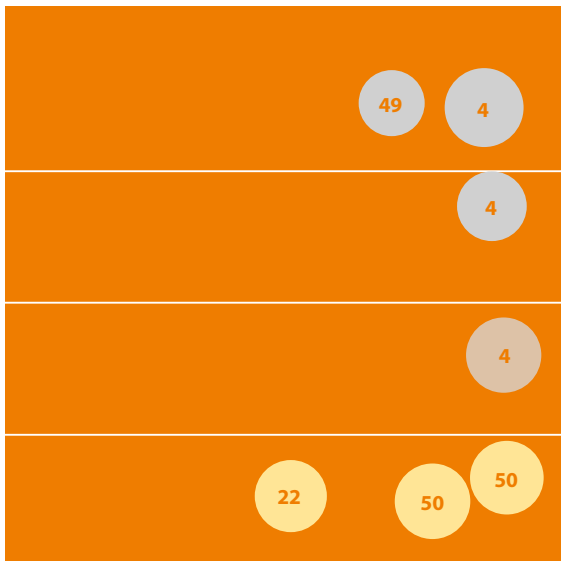
© CAFREtv

Список использованной литературы

- United Nations Environment Programme (2014). *UNEP Year Book 2014*. Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9240>
- Duce, R.A., LaRoche, J., Altieri, K., Arrigo, K.R., Baker, A.R., Capone, D.G. *et al.* (2008). Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science* 320, 893–897. <https://doi.org/10.1126/science.1150369>
- Voss, M., Bange, H.W., Dippner, J.W., Middelburg, J.J., Montoya, J.P. and Ward, B. (2013). The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130121–20130121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0121>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erismann, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P. van Grinsven, H. and Grizzetti, B. (eds.) (2011). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>
- Pearce, F. (2018). Can the world find solutions to the nitrogen pollution crisis? *Yale Environment* 360, 6 February. <http://e360.yale.edu/features/can-the-world-find-solutions-to-the-nitrogen-pollution-crisis>
- Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z. *et al.* (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494, 459–462. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11917>
- Fowler, D., Steadman, C.E., Stevenson, D., Coyle, M. Rees, R.M. Skiba, U.M. *et al.* (2015). Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 13849–13893. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13849-2015>
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- United Nations Environment Programme (2013). *Drawing Down N₂O to Protect Climate and the Ozone Layer: A UNEP Synthesis Report*. Alcamo, J., Leonard, S.A., Ravishankara, A.R. and Sutton, M.A. (eds.) Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8489>
- Suddick, E.C., Whitney, P., Townsend, A.R. and Davidson, E.A. (2012). The role of nitrogen in climate change and the impacts of nitrogen–climate interactions in the United States: foreword to thematic issue. *Biogeochemistry* 114, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z>
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W. *et al.* (2013). Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, UK: NERC/Centre for Ecology & Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Aneja, V.P., Raghuram, N., Pathak, H., Kulshrestha, U., Sharma, C. and Singh, B. (eds.) (2017). *The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*. UK: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128118368/the-indian-nitrogen-assessment>
- Van Grinsven, H.J.M., Holland, M., Jacobsen, B.H., Klimont, Z., Sutton, M.A. and Willems, W.J. (2013). Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation. *Environmental Science & Technology* 47, 3571–3579. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es303804g>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). *Human Acceleration of the Nitrogen Cycle: Managing Risk and Uncertainty*. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307438-en>
- Brunekreef, B., Harrison, R.M., Künzli, N., Querol, X., Sutton, M.A., Heederik, D.J.J. *et al.* (2015) Reducing the health effect of particles from agriculture. *Lancet Respiratory Medicine* 3(11), 831–832. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(15\)00413-0](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(15)00413-0)
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D. *et al.* (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change* 26, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Leip, A., Wagner, S., De Marco, A. *et al.* (2015). *Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment*. European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food. UK: Centre for Ecology & Hydrology. https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Nitrogen_on_the_Table_Report_WEB.pdf
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.J., Lassaletta, L. *et al.* (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Brownlie W.J., Howard, C.M., Pasda, G., Nave, B., Zerulla, W. and Sutton, M.A. (2015). Developing a global perspective on improving agricultural nitrogen use. *Environmental Development* 15, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.002>
- EU Nitrogen Expert Panel (2015). *Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in food systems*. Wageningen, NL: Wageningen University. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/N-ExpertPanel-NUE-Session-1.pdf>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Brownlie, W.J., Skiba, U., Hicks, K.W., Winiwarter, W. *et al.* (2017). The European Nitrogen Assessment 6 years after: What was the outcome and what are the future research challenges? In *Innovative Solutions for Sustainable Management of Nitrogen*. Dalgaard, T. *et al.* (eds). Aarhus, Denmark, 25–28 June. Aarhus, DK: Aarhus University and the dNmark Research Alliance. http://sustainableconference.dnmark.org/wp-content/uploads/2017/06/JYC_Final_Book-of-abstracts160617.pdf
- Reis, S., Bekunda, M. Howard, C.M., Karanja, N. Winiwarter, W., Yan, X. *et al.* (2016). Synthesis and review: Tackling the nitrogen management challenge: from global to local scales. *Environmental Research Letters* 11, 120205. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/120205/meta>
- Umweltbundesamt (2015). *Reactive Nitrogen in Germany: Causes and effects - measures and recommendations*. Dessau-Roßlau: The German Environment Agency (Umweltbundesamt). <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/reactive-nitrogen-in-germany>

24. Tomich T.P., Brodt, S.B., Dahlgren, R.A. and Scow, K.M. (eds.) (2016). Davis, CA: University of California Press. <http://asi.ucdavis.edu/programs/sarep/research-initiatives/are/nutrient-mgmt/california-nitrogen-assessment>
25. Galloway J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R. et al. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
26. Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. and Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
27. Davidson, E.A., Davidson, M.B., David, J.N., Galloway, C.L., Goodale, R., Haeuber, J.A. . (2012). Excess nitrogen in the U.S. environment: trends, risks, and solutions. 15. The Ecological Society of America, Washington. <http://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2013/03/issuesinecology15.pdf>
28. Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M.A., Cape, J.N., Reis, S. (2013). The global nitrogen cycle of the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B*. 368, 2130164. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
29. Bleeker, A., Sutton, M., Winiwarter, W. and Leip, A. (2013) *Economy Wide Nitrogen Balances and Indicators: Concept and Methodology*. OECD, Environment Directorate, Environment Policy Committee, Working Party on Environmental Information, Paris, France ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1. Paris. <http://inms.iwlearn.org/inms-meeting-lisbon/NBalancesandIndicators.pdf>
30. Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H. and Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature* 472, 159-161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
31. Masso, C., Baijukya, F., Ebanyat, P., Bouaziz, S., Wendt, J., Bekunda, M. et al. (2017). Dilemma of nitrogen management for future food security in sub-Saharan Africa – a review. *Soil Research* 55(6), 425-434. <https://doi.org/10.1071/SR16332>
32. United Nations Statistic Division (2018). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York. A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
33. Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. and Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
34. Sutton, M.A., Reis, S., Riddick, S.N., Dragosits, U., Nemitz, E., Theobald, M.R. et al. (2013). Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission & deposition. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Ser. B)* 368, 20130166. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>
35. Van Grinsven, H.J., Tiktak, A. and Rougoor, C.W. (2016). Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 78, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.010>
36. Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O. and Sutton, M.A. (eds.) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf>
37. Gu, B.J., Ju, X.T., Chang, J., Ge, Y. and Vitousek, P.M. (2015). Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. 112, 8792-8797. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510211112>
38. Ju, X.T., Gu, B.J., Wu, Y.Y. and Galloway, J.N. (2016). Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. 41, 26-32. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>
39. Mangano E., Kahr, J., Wright, P.A. and Brandani, S. (2016). Accelerated degradation of MOFs under flue gas conditions. *Faraday Discussions*, 192. <https://doi.org/10.1039/C6FD00045B>
40. Food and Agriculture Organization (2016). Zero Budget Natural Farming in India. *Agroecology Knowledge Hub Trends in Biosciences Circular Economy Package: Questions & Answers*. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>.
41. Bishnoi, R. and Bhati, A. (2017) An Overview : Zero Budget Natural Farming. *Trends in Biosciences* 10(46), 9314-9316
42. European Commission (2015). Circular Economy Package: Questions & Answers. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm
43. European Commission (2015). Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2015) 614 final. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
44. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015). *Nitrogen: Strategies for resolving an urgent environmental problem - Summary*. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02_Special_Reports/2012_2016/2015_01_Nitrogen_Strategies_summary.html
45. Austin, A.T., Bustamante, M.M.C., Nardoto, G.B., Mitre, S.K., Perez, T., Ometto, J.P.H.B. et al. (2013). Latin America's Nitrogen Challenge. *Science* 340, 149. <https://doi.org/10.1126/science.1231679>
46. United Nations Environment Programme (2018). *Resolutions and Decisions: UNEA 2*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/resolutions-and-decisions-unea-2>
47. United Nations Environment Programme (2018). *Documents: Third session of the UN Environment Assembly*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/node/40741>
48. Sutton, M. (2018). The global nitrogen challenge: a case of too much and too little nutrients. A presentation to the Committee of Permanent Representatives to the United Nations Environment Programme, 24 October 2018. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26379/Sutton%20Global%20Nitrogen%20Challenge%20%28UNEP%20CPR%20Oct%202018%29.pdf?sequence=24&isAllowed=y>

Список использованных графических материалов



49. Zhang, R., Tie, X. and Bond, D.W. (2002). Impacts of anthropogenic and natural NOx sources over the U.S. on tropospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(4), 1505-1509. <https://doi.org/10.1073/pnas.252763799>
50. FAO (2011). *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>
51. Ussiri D., Lal R. (2013) *Global Sources of Nitrous Oxide*. In: *Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5364-8_5
52. IFA (2018). *International Fertilizer Association database (IFASTAT)*. International Fertilizer Association, Paris. <https://www.ifastat.org/>
53. Behera, S.N., Sharma, M., Aneja, V.P. and Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092-8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>
54. Field, C.D., Dise, N.B., Payne, R.J., Britton, A.J., Emmett, B.A., Helliwell, R.C., Hughes, S, et al. 2014. The Role of Nitrogen Deposition in Widespread Plant Community Change Across Semi-natural Habitats. *Ecosystems*, 17, 864-877. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9765-5>
55. Payne, R. J., N. B. Dise, C. J. Stevens, D. J. Gowing, and Begin Partners. 2013. 'Impact of Nitrogen Deposition at the Species Level'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3): 984–87. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214299109>
56. Sheppard, L. J., Leith, I. D., Mizunuma, T., Cape, N., Crossley, A., Leeson, S., Sutton, M.A., Dijk, N. and Fowler, D. (2011). Dry deposition of ammonia gas drives species change faster than wet deposition of ammonium ions: evidence from a long-term field manipulation. *Global Change Biology*, 17: 3589-3607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02478.x>





Наводнение 2011 года в Бангкоке, Таиланд
Фотография предоставлена: Wutthichai / Shutterstock.com

Плохая адаптация к изменению климата: как не попасть в западню на пути сохранения способности к эволюционному развитию

Определение адаптации и плохой адаптации в контексте изменения климата

Метафоры являются крайне важным элементом логического мышления. Применительно к исследованиям и политике в области изменения климата термины «адаптация» и «плохая адаптация» заимствованы из эволюционной биологии.¹ В принципе, генетические мутации появляются в каждом поколении того или иного биологического вида самопроизвольно, и процесс естественного отбора под воздействием условий внешней окружающей среды предопределяет успех или неудачу как этих мутаций, так и, соответственно, биологических видов. Эту идею можно применить к бактериям, растениям и животным, экосистемам и даже к моделям поведения человека. Важной особенностью успешной адаптации является сохранение способности к эволюционному развитию, то есть способности продолжать развитие путем дальнейшей адаптации к непрерывно меняющимся условиям окружающей среды.² В эволюционной биологии определяющим признаком плохой адаптации является отсутствие способности к эволюционному развитию. Это тупик.

Хотя истоки адаптации берут начало в эволюционной биологии, использование этого термина для обозначения успешного реагирования человека на изменения в окружающей среде началось во время борьбы со стихийными бедствиями. В этой сфере все меры реагирования на то или иное стихийное бедствие, предпринимаемые человеком, в том числе усилия, направленные на ослабление или исключение воздействия со стороны источника бедствия, представляют собой адаптацию к изменившимся условиям.³ В ходе переговоров по Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКООНИК) эти меры были разделены на так называемые меры по борьбе с загрязнением, и адаптационные меры. Одним из логических обоснований для их разграничения стало то, что участники переговоров могли отложить попытки достижения договоренности о путях борьбы с выбросами или смягчения их последствий, принимая во внимание то, что адаптация выглядела менее трудоемким вариантом достижения цели.⁴ Другое объяснение заключается в том, что развитые страны поддержали бы только те усилия, которые приносят конечные результаты всемирного масштаба, такие как сокращение концентрации

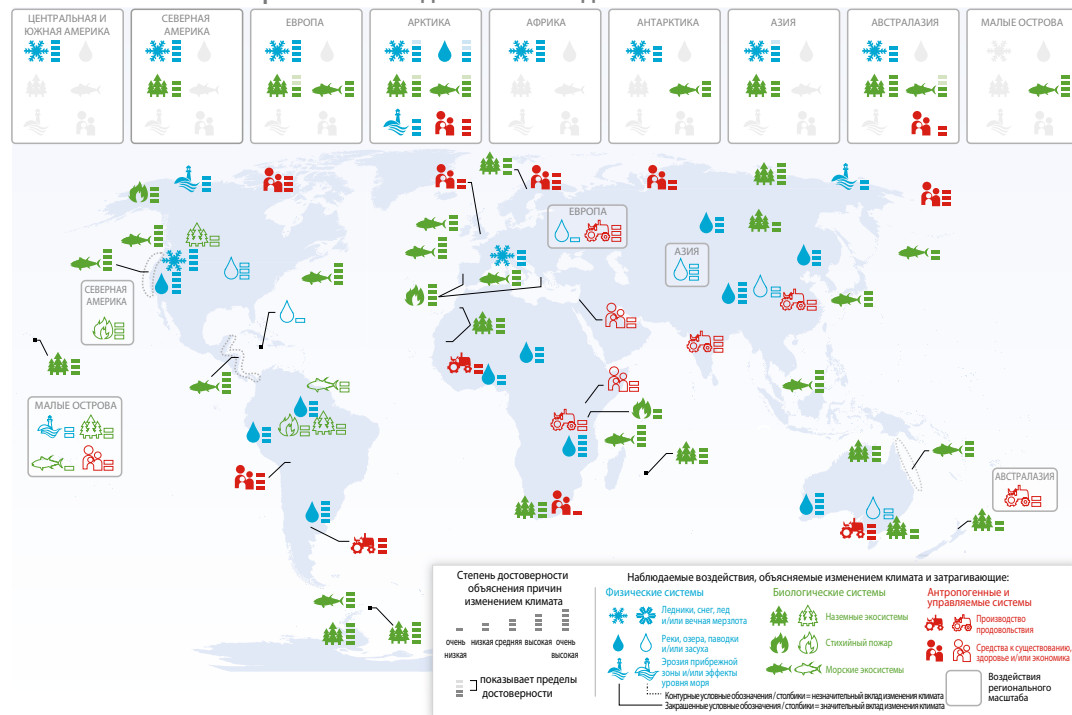
диоксида углерода в атмосфере, а не меры по адаптации, ориентированные на решение задач местного уровня.⁵

По мере поэтапного продвижения вперед на переговорах об изменении климата исследователи приступили к изучению того, как и почему некоторые адаптационные меры отклоняются от заданного направления, особенно те из них, на которые затрачиваются значительные объемы людских, природных или финансовых ресурсов.⁶ При формировании этих точек зрения Межправительственная группа экспертов Организации Объединенных Наций по изменению климата (МГЭИК) осознала важность согласования точной и недвусмысленной терминологии. В 2001 году эта группа предложила принять эталонное определение плохой адаптации, которое отличается от того, как этот термин используется в биологии или поведенческих науках, а именно как «...адаптация, которая не уменьшает уязвимость, а наоборот увеличивает ее».⁷ В ходе дальнейших обсуждений основное внимание уделялось различиям между плохой адаптацией и неуспешной адаптацией. Неуспешная адаптация может быть нейтральной – это может просто означать, что то или иное действие не привело к искомому результату. Но когда преднамеренная адаптация приводит к повышению уязвимости других групп населения и секторов, пусть даже в будущем, то такие меры представляют собой плохую адаптацию.⁸ В то же

время ни неуспешную адаптацию, ни плохую адаптацию не следует путать с фиктивной адаптацией — расточительными проектами, представленными как адаптация, такими как создание дорогостоящих инфраструктурных объектов, обслуживающих особые интересы небольшой группы людей, которые фактически не повышают жизнестойкость или не понижают уязвимость перед лицом изменения климата.⁹

Осмысление понятия «плохая адаптация» продолжается, и в одном из авторитетных исследований эта проблема рассматривается под углом зрения конечных результатов, что позволило выявить пять категорий плохой адаптации по сравнению с альтернативными вариантами. Согласно этому анализу плохая адаптация — это такие действия, которые увеличивают выбросы парниковых газов, возлагают несоразмерное бремя на наиболее уязвимые слои населения, сопряжены с повышенными затратами по сравнению с альтернативными вариантами, ослабляют стимулы к адаптации или задают движение по пути, который ограничивает возможности выбора, доступные будущим поколениям.⁸ Эти параметры были уточнены и расширены в Пятом оценочном докладе, опубликованном МГЭИК в 2014 году.¹⁰ По мере того, как концепция противопоставления адаптации и плохой адаптации проясняется и появляется возможность проведения более четкого различия между ними, задача устранения последствий изменения климата должна становиться все менее пугающей.

Глобальные закономерности наблюдаемых последствий изменения климата



Каждый символ, внесенный в расположенные сверху ячейки, обозначает класс систем, для которых изменение климата сыграло значительную роль в наблюдаемых изменениях в соответствующем регионе по крайней мере в одной из систем в пределах этого класса, а доверительный интервал атрибуции этих общерегиональных последствий обозначен столбиками. Последствия регионального масштаба, в которых фактор изменения климата играет незначительную роль, показаны в виде контурных символов во вставках, расположенных на картографическом изображении соответствующего региона. Субрегиональные последствия обозначаются на карте символами, размещенными в примерной области их возникновения. Район, подвергшийся воздействию, может представлять из себя как конкретную точку на карте, так и обширную область, например, бассейн крупной реки. Обозначения факторов воздействия на физические (синий), биологические (зеленый) и антропогенные (красный) системы различаются по цвету. Отсутствие воздействия изменения климата на этой диаграмме не означает, что такого воздействия не произошло.

Источник: Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата¹¹

Нарастание проблем плохой адаптации

В условиях изменения климата понятие плохой адаптации развивается, и в сферу ее охвата теперь входят не только неработоспособные меры по адаптации, но и адаптационные действия, которые наносят ущерб ресурсам, сужают круг будущих вариантов, усугубляют проблемы, с которыми сталкиваются уязвимые слои населения, или передают ответственность за решение этих проблем будущим поколениям. Если адаптационные меры нарушают принципы устойчивого развития, социальной справедливости и искоренения нищеты, особенно в том смысле, что они возлагают несоразмерное бремя на уязвимые слои населения, то эти меры становятся составной частью плохой адаптации.¹² Усилия, направленные на предотвращение широкомасштабного распространения плохой адаптации, включают проведение исследований по выявлению основных рисков и разработку стратегий ответственной адаптации на протяжении всего жизненного цикла инфраструктурных активов, которые могут быть положены в основу принимаемых решений и действий специалистов по вопросам планирования и регулирующих органов, проектировщиков, строителей, операторов, инвесторов и страховщиков.¹³ Угрозы, порождаемые плохой адаптацией, скорее всего, будут возрастать по мере увеличения масштабов предпринимаемых действий. Используя пример способности к эволюционному развитию в биологии, можно проводить предварительный отсев мер, ведущих к плохой адаптации, а выдвигание на первый план задачи сохранения способности к эволюционному развитию может предупредить возникновение серьезных ошибок.

Ограничение будущих вариантов на уровне возведения волноотбойной стены вдоль границ участка, находящегося в частной собственности, может рассматриваться как плохая адаптация, поскольку это вызовет проблемы и ограничит варианты выбора для соседей, но последствия таких действий обычно влияют только на близлежащие окрестности. Однако если плохо продуманное действие усугубляет изначальные проблемы или ограничивает будущий выбор в региональном или глобальном масштабе, то это становится гораздо более опасной плохой адаптацией. В более широком плане такие проявления плохой адаптации могут не только ограничить способность к эволюционному развитию, но и поставить под угрозу жизнестойкость экосистем, образа жизни и целых обществ. Широкая распространенность плохих адаптационных действий, особенно тех, которые приводят к увеличению выбросов парниковых газов или усиливают деградацию экосистем, может внести свой вклад в формирование биогеофизических обратных связей, подталкивающих систему Земли к переломным моментам, которые могут привести к нарушению равновесия в глобальном масштабе. Многие из этих переломных моментов необратимы, например утрата вечной мерзлоты, коралловых рифов или тропических лесов Амазонии, и эта необратимость может подвести человечество к переходу отметки общепланетарных пороговых значений.¹³



Сокращенное изложение определения плохой адаптации, содержащегося в Пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата¹⁰

В Пятом оценочном докладе, опубликованном МГЭИК в 2014 году, Рабочая группа II по воздействиям, уязвимости и адаптации (РГИ) определила плохую адаптацию как «... действия, которые могут привести к повышенному риску неблагоприятных, связанных с климатом последствий, большей уязвимости к изменению климата или ухудшению благосостояния в настоящее время или в будущем». В нем также представлена сводная таблица с двенадцатью широкими категориями плохой адаптации.

В двух из предложенных РГИ категорий описываются действия, которые намеренно игнорируют то, что уже известно: неспособность предвидеть ожидаемое изменение климата и неспособность принимать во внимание более широкие последствия. К другим категориям относятся: компромиссные решения, когда задача уменьшения уязвимости в долгосрочной перспективе вытесняется целью получения краткосрочных преимуществ, в том числе за счет истощительного расходования ресурсов, которое приводит к возникновению уязвимости на более позднем этапе; промедление как альтернатива быстрым непродуманным действиям; возведение объектов инфраструктуры, не рассчитанных на длительную эксплуатацию; и угроза недобросовестности, когда принятие риска стимулируется различными схемами получения выгоды.

В остальных категориях на первый план выдвигаются действия, которые ставят одну группу, часто элиту, в привилегированное положение по отношению к другим слоям населения, в качестве предупреждения о том, что увековечивание привилегий может привести к конфликту, а также к действиям, которые игнорируют местные знания, традиции и сложившиеся взаимоотношения. Вместе с тем настойчивая реализация традиционных, но неадекватных мер реагирования также считается плохой адаптацией.

Наряду с этим РГИ предостерегает от действий, создающих трудноустраняемую зависимость от предыдущих решений, и действий, особенно по возведению защитных сооружений и принятию соответствующих решений, которые исключают альтернативные подходы, такие как адаптация на экосистемной основе. Наконец, миграция может стать надлежащей адаптацией или плохой адаптацией — или и тем, и другим — в зависимости от конкретных условий и конечного результата.

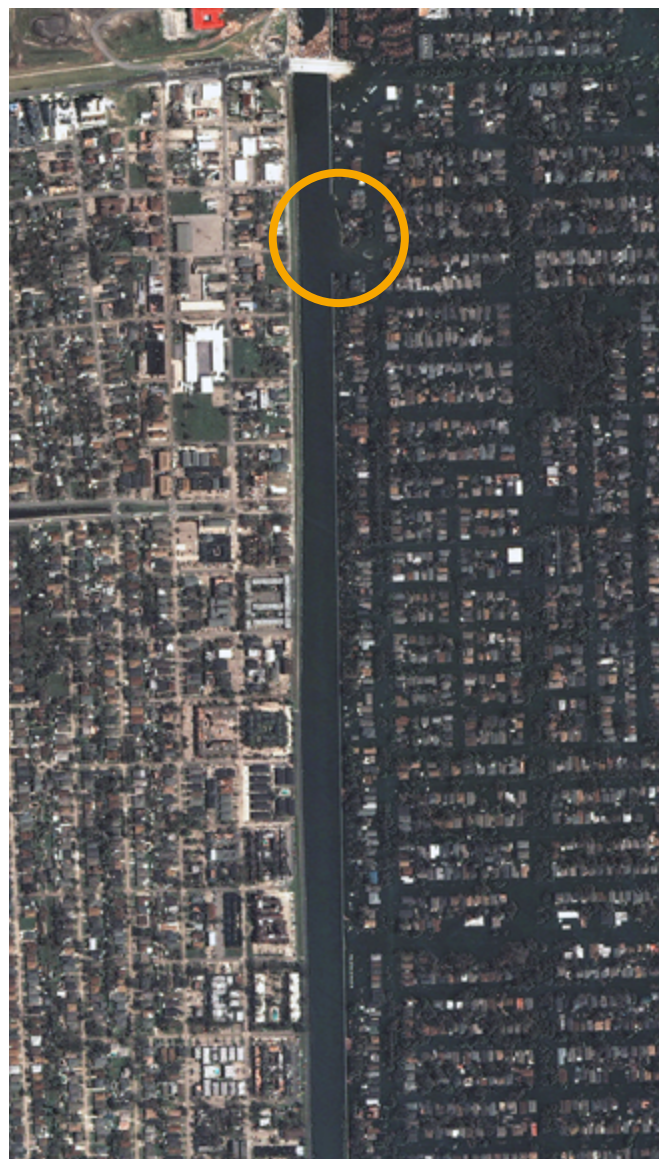
В докладе МГЭИК «Глобальное потепление на 1,5°C», опубликованном в 2018 году, определены многочисленные требования к эффективной адаптации, демонстрирующие важное значение климатосберегающих методов планирования и осуществления в период перехода к приемлемому приросту температуры.¹⁵ Важнейший компонент этого перехода заключается в предотвращении плохой адаптации. Ряд случаев регионального масштаба, которые, по собственной оценке действующих лиц, являются или не являются ответными мерами в связи с изменением климата, могут служить примерами полезных исследований, поскольку нас ожидает будущее, которому будет нанесен ущерб изменением климата. Эти случаи представляют собой краткие описания категорий, представленных в Пятом оценочном докладе МГЭИК и других рефератах текущей научной литературы.

Обеспечение баланса между краткосрочными нуждами и планированием долгосрочной жизнестойкости

Примером нахождения баланса между краткосрочными и долгосрочными выгодами, который уже был представлен в качестве наглядного примера возможного присутствия элементов плохой адаптации, служит проект создания устойчивой к изменению климата прибрежной инфраструктуры на юго-западе Бангладеш.¹⁶ Суть вопроса заключается в сравнении преимуществ адаптации, которые могут быть получены в течение ближайших двух десятилетий, с более долгосрочными издержками плохой адаптации, которые возобладают к 2050 году по мере затопления этого региона в результате повышения уровня моря.¹⁶ К потенциальным конечным результатам плохой адаптации относятся сложные проблемы миграции как за пределы региона, так и на его территорию. Инвесторы рассчитывают на то, что новые рынки и улучшенные дороги, мосты, дренажные системы и укрытия от циклонов убедят людей, проживающих в прибрежных районах, остаться, хотя, возможно, им следовало бы переехать вглубь страны. Существует большая вероятность того, что эти объекты привлекут новых жителей, возможно, включая некоторую часть обитателей неформальных поселений в Дакке, которые уже были перемещены в результате экологических катастроф.¹⁸

Возложение несопоставимого бремени на наиболее уязвимые слои населения

В некоторых случаях попытки адаптации к изменяющимся условиям по нескольким направлениям могут стать плохой адаптацией для конкретных слоев населения. После того как в 2005 году ураган «Катрина» опустошил Новый Орлеан и прилегающий к нему регион США, первоначальные планы по созданию новых озелененных зон в целях повышения жизнестойкости городов перед угрозой будущих наводнений предусматривали приобретение участков на низменных землях, которые традиционно принадлежали малоимущим афроамериканцам, а не другим группам населения.^{12,19} Это конкретное предложение по обновлению городов принято не было. Однако более десяти лет спустя исследования показали, что многие из беднейших и наиболее социально отчужденных жителей города так и не смогли вернуть себе то немногое, чем они обладали, и значительная их часть была вынуждена уехать за пределы этого региона.^{12,19}



Фотография предоставлена: Digital Globe (www.digitalglobe.com)

В августе 2005 года ураган «Катрина» серьезно повредил многие участки системы дамб, предназначенной для защиты низинных районов Нового Орлеана от наводнений и штормовых нагонов. Как видно на спутниковом снимке, прорыв дамбы позволил паводковой воде хлынуть из канала на 17-й улице в районы на его восточной стороне и затопить их, причинив имущественный ущерб на миллиарды долларов.

Плохая адаптация к изменению климата

Наглядные примеры, представленные в инфографике, демонстрируют ряд действий по адаптации к изменению климата в различных масштабах. В некоторых случаях эти действия либо привели к плохой адаптации по причине непредвиденных последствий, либо станут примером плохой адаптации в ближайшем будущем. Другая категория — это действия, предпринятые после рассмотрения многих факторов, с целью исключить возможность плохой адаптации.

Согласно определению МГЭИК плохая адаптация — это преднамеренные адаптационные действия, которые вопреки задуманному повышают риск связанного с климатом ущерба, повышают уязвимость к изменению климата или уменьшают благосостояние в настоящее время или в будущем.

Плохие адаптационные меры — это результат неудачного выбора между имеющимися альтернативами, то есть такой выбор, который увеличивает выбросы парниковых газов, несправедливо обременяет наиболее уязвимые слои населения, влечет за собой неоправданные издержки, ослабляет стимулы к адаптации или ограничивает возможности выбора, доступные будущим поколениям.

При
нятии решений,
**игнорирующих
результаты научных
исследований**, более
широкие возможные
осложнения или
вероятные
последствия

Действия в
пользу одной группы
заинтересованных лиц
за счет другой, что
увеличивает вероятность
возникновения **будущих
конфликтов и
ущерба**

**Неразумные
компромиссы:**
краткосрочные выгоды
вместо долгосрочных
преимуществ, риск ради выгоды
(риск недобросовестности),
слишком короткий период
рассмотрения вместо
слишком
продолжительного

Действия,
обуславливающие
**зависимость от
предыдущих решений**
и безальтернативного
применения углеродоемких
технологий или
ликвидирующие
возможности выбора для
будущих поколений

Переселение,
которое ставит
различные группы
населения в еще
**более опасные
условия**

Засуха

Изменение климата нарушает круговорот воды в природе. Засухи станут более интенсивными, частыми и непрерывно возобновляющимися, угрожая всем видам деятельности человека и функционированию экосистем. Продолжительная засуха приводит к чрезмерной эксплуатации запасов подземных вод, и после дождей водоносные горизонты редко пополняются в достаточной степени.

К 2025 году
**48% всех земель
мира, скорее всего,
станут
засушливыми
районами**

Регулярно
повторяющиеся засухи
вынудили 70% малоимущих
сомалийских скотоводов
заняться производством
древесного угля, что привело к
масштабной вырубке лесов,
которая **ускорила процесс
опустынивания** и привела
к **повышению
уязвимости**

Сельское хозяйство

В результате изменения климата регулярно возобновляющиеся экстремальные погодные явления ставят под угрозу системы сельскохозяйственного производства. Фермеры гордятся своей способностью адаптироваться к изменяющимся условиям, но экстремальные явления случаются так часто и повторяются с такой непредсказуемостью, что адаптация становится постоянным поводом для беспокойства.

Некоторые
зимбабвийские
фермеры компенсируют
климатическую неопределенность
расширением масштабов
использования пестицидов.
Слишком часто уничтожаются и
полезные насекомые, что
приводит к ухудшению
условий выращивания
сельскохозяйственных
культур.

В
Бразилии после
внедрения **адаптиро-
ванных к климату сортов
сельскохозяйственных
культур** начали снимать два
урожая в год. Поскольку
начало сезона дождей
сдвигается, эта практика
становится плохой
адаптацией.

Нехватка воды

К 2050 году 5,7 миллиарда человек могут проживать в районах, испытывающих нехватку воды. Регионы уже адаптируются к нехватке воды за счет эксплуатации подземных вод, нормирования воды или опреснения. В долгосрочной перспективе такие меры могут оказаться плохой адаптацией.

С нехваткой воды
сталкивается Мексика.
Эксплуатация удаленных
источников подземных вод
является краткосрочным
решением. Реальная адаптация
означает инвестирование средств в
долгосрочные решения, такие как
сбор дождевой воды, а также
очистка бытовых сточных вод
и их повторное
использование.



Охрана здоровья

Сдвиг границ климатических зон и увеличение частоты и интенсивности экстремальных климатических явлений отражаются на состоянии здоровья. Эта нестабильность приводит к снижению урожайности и повышению распространенности переносчиков болезней, угрожающих критически важным биологическим видам, а также человеку.

Антибиотики
применяются в
чрезмерных количествах
и ненадлежащим образом как
в целях профилактики, так и для
лечения ветеринарных болезней.
Плохая адаптация к
трансмиссивным болезням
усугубляет угрозы, связанные
с устойчивостью
к антибиотикам.

В одном из
исследований показано,
что навоз крупного рогатого
скота, которого лечили
антибиотиками, **выделяет
больше метана**, чем навоз, не
содержащий антибиотиков.
Остатки антибиотиков также
приводили к изменению
кишечной микрофлоры
навозных жуков.



Повышение уровня моря

Во всем мире уровень моря продолжает повышаться, что ставит под угрозу инфраструктуру, запасы подземных вод, природные барьерные острова и прибрежные общины. Угроза самому существованию низколежащих стран и малых островных государств затрагивает образ жизни миллионов людей.

Во Флориде уровни воды в каналах используются для поддержания давления, препятствующего **проникновению соленых вод** в пресные подземные воды. Повышение уровня моря обуславливает необходимость поддержания более высоких уровней воды, что увеличивает угрозу наводнений.

На Гавайях законодательство штата гарантирует доступ коренных жителей к побережью для культурных целей и рыбного промысла как источника средств к существованию. Повышение уровня моря ограничивает доступность побережья для людей, что в несоразмерно большей степени сказывается на положении малоимущих слоев населения, при этом продолжают осуществляться проекты в целях получения прибыли частными компаниями.

Крупные города

К 2050 году в крупных городах будет жить 70% населения мира. Во всем мире крупные города уже сталкиваются с последствиями изменения климата, проявляющимися в виде периодов сильной жары, наводнений и сбоев в адаптации. Процесс городской адаптации включает политические установки, развитие инфраструктуры или технологические решения. Принимаемые решения редко приносят пользу всем, но могут создавать угрозу интересам социально отчужденных групп населения.

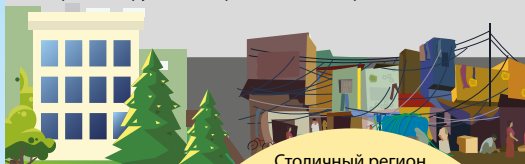


Потепление и нехватка воды побудили власти города Мельбурна в Австралии расширить масштабы кондиционирования воздуха и опреснения морской воды. Это плохие адаптационные меры, поскольку: способствуя увеличению выбросов ПГ, они усугубляют уязвимость других систем, секторов и общин.



Наводнения

Наводнения являются одним из наиболее распространенных последствий изменения климата во всем мире. Существующих систем регулирования паводков и управления водными ресурсами, справляющихся с чрезвычайными ситуациями в прошлом, уже недостаточно. В условиях продолжающегося изменения климата избежать плохой адаптации можно только путем перехода к адаптивному управлению на основе вовлеченности широкого круга заинтересованных сторон.



Столичный регион Бангкока подвержен наводнениям из-за отсутствия планирования и инвестиций. Незапланированная и плохо скоординированная **«автономная адаптация»** приводит к затоплению территорий, расположенных ниже по течению, и ослабляет всю дренажную систему государства. Официальные меры реагирования на наводнения, принятые в 2011 году, предусмотрели защиту материально обеспеченных людей и возложили слишком тяжелое бремя на уязвимые слои населения.

Уязвимость общества

Во всем мире люди приспосабливаются к последствиям изменения климата различными способами: переселившиеся подходы к водоснабжению, внедряя схемы страхования рисков, изменяя стратегии обеспечения доступности средств к существованию, принимая решение о добровольной или вынужденной миграции и реализуя проекты переселения. Когда эти методы, преследующие благие намерения, плохо подходят для местных условий или не учитывают многочисленные аспекты проблемы, уязвимость может повыситься.

Проекты переселения, осуществляемые в Китае в целях адаптации к изменению климата, предусматривают финансовые стимулы и повышение уровня жизни. Наряду с этим они возлагают **несоразмерно тяжелое бремя** на тех, кто оказался забыт, на тех, кто уже перемещен, и на малоимущие слои населения.



Лесные пожары

С 1979 по 2013 год продолжительность пожароопасного сезона во всем мире увеличилась на 19%. Лесные пожары играют важную роль в экосистемах всего мира, но их разрушительная сила может привести к краху социально-экономических систем. В некоторых регионах стандартные стратегии управления усугубляют положение дел.



После десятилетий борьбы с пожарами и пяти лет засухи, обусловленной изменением климата, калифорнийские леса полны **топлива для лесных пожаров**. Учитывая произошедшие изменения, органы власти штата собираются провести **контролируемое выжигание** растительности, чтобы справиться с этой угрозой.

Некоторые фермеры стремятся защитить себя от экстремальных погодных явлений посредством **страхования урожаев**, что может препятствовать реализации стратегий более глубокой адаптации.

Политические установки в области страхования являются плохой адаптацией, если они стимулируют модели поведения, сопряженные с повышенным риском, например восстановление зданий в опасных местах, или способствуют замещению, а не перестройке имеющихся объектов в соответствии с изменяющимися условиями. По мере усиления климатических угроз страхование может создавать **ложное чувство безопасности**.

В малых островных государствах все более высокие приливы захлестывают побережье, уничтожая запасы пресной воды и посевы. Исследователи предполагают, что наилучшим долгосрочным решением в целях предотвращения плохой адаптации, связанной с переселением, является **мобильность рабочей силы**.



ПЛОХАЯ АДАПТАЦИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА: КАК НЕ ПОПАСТЬ В ЗАПАДНЮ НА ПУТИ СОХРАНЕНИЯ СПОСОБНОСТИ К ЭВОЛЮЦИОННОМУ РАЗВИТИЮ

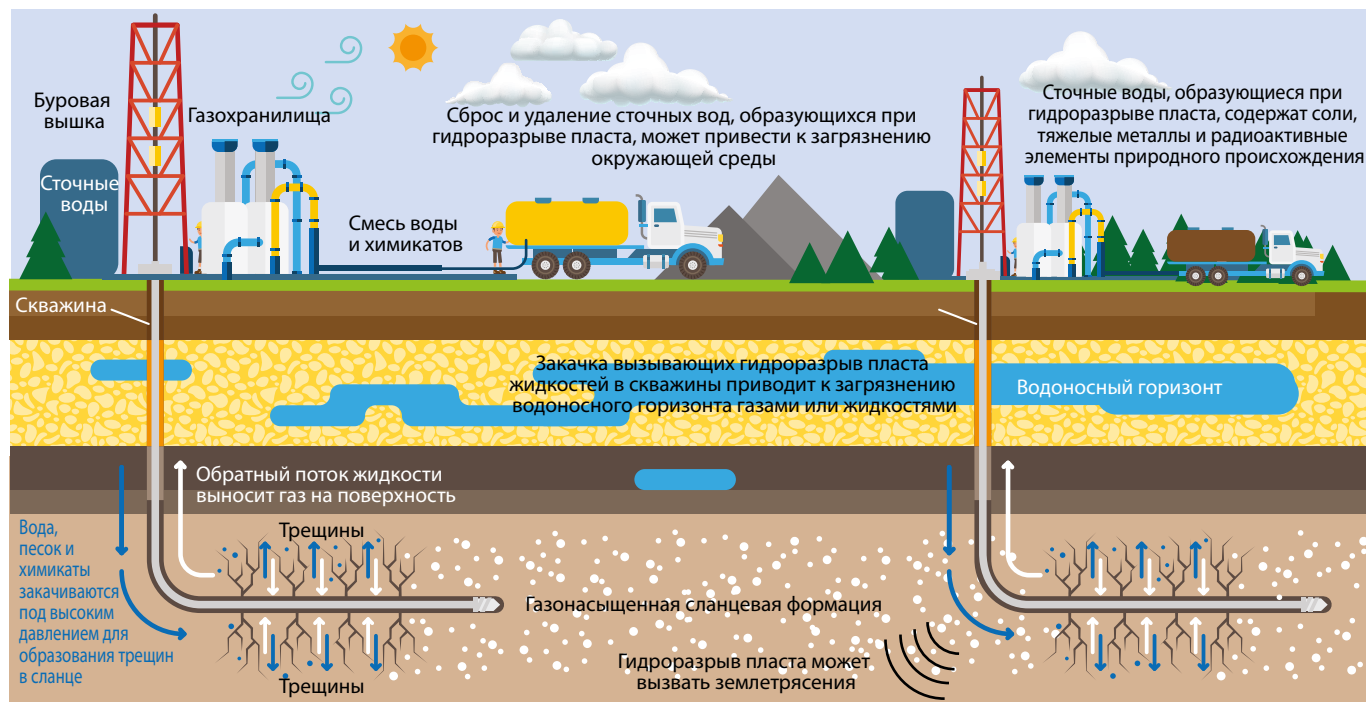
Ограничение вариантов будущих действий

Геологи и инженеры-нефтяники разработали методы извлечения нефти и газа из глубоких резервуаров, загерметизированных слоем покрывающей породы.²¹ Считается, что некоторые истощенные резервуары могут на протяжении веков и даже тысячелетий связывать диоксид углерода.²² Их пригодность обусловлена нашей уверенностью в непроницаемости этих хранилищ и достаточном качестве слоя покрывающей породы, герметизирующего резервуар.^{21,23} Когда применение природного газа пропагандировалось в качестве стратегии смягчения последствий, то есть в качестве связующего звена при переходе от сжигания угля и нефти к возобновляемым источникам энергии, инвестиции росли, а технология развивалась.²⁴ Однако это переходное решение породило больше проблем, чем первоначально предполагалось. Многие из этого было связано с развитием техники добычи, получившей название гидроразрыв пласта, или фрекинг.^{25,26} Эта технология предусматривает, что под землю под высоким давлением закачивается смесь воды, песка и химикатов, создающая щели и трещины в резервуаре в целях высвобождения природного газа. В результате гидроразрыва пласта возникает ряд экологических проблем, включая истощение водоносных горизонтов и их загрязнение химическими

веществами, используемыми при бурении и нагнетании, утечку метана в окружающую среду и повышенную сейсмичность.²⁷⁻³⁰ Кроме того, есть основания полагать, что гидроразрыв пласта способен разрушить герметизирующую покрывающую породу, которая позволяет использовать истощенные резервуары в качестве ценного механизма связывания углерода.^{31,32}

В докладе МГЭИК «Глобальное потепление на 1,5°C» приводится подробное описание двух путей сокращения выбросов и ограничения поступления парниковых газов в атмосферу, которые позволяют достичь цели удержания среднемирового повышения температуры по сравнению с доиндустриальными уровнями в пределах 1,5°C. Оба пути в значительной степени зависят от перспектив связывания углерода в геологических формациях.¹⁵ Эта политика поощрения использования гидроразрыва пласта служит наглядным примером плохой адаптации по двум причинам: она предоставляет возможность отказаться от долгосрочных преимуществ ради краткосрочных выгод и способствует попаданию в зависимость от предыдущих решений, наносящих ущерб будущим ресурсам. В то же время гидроразрыв пласта увеличивает выбросы парниковых газов за счет утечки метана на протяжении всего производственного цикла.^{26,33-35}

Гидроразрыв пласта или фрекинг





Газовое месторождение Джона, штат Вайоминг, Соединенные Штаты Америки

Фотография предоставлена: EcoFlight

Предотвращение плохой адаптации в условиях ограничения глобального потепления не более чем на 1,5°C

Видение будущего, предложенное в докладе МГЭИК «Глобальное потепление на 1,5°C», и оправданность замысла удержания повышения температуры в этих пределах, позволяют сделать вывод о том, что последствия изменения климата должны быть более широко рассмотрены в решениях, принимаемых в государственном и частном секторах, а также гражданским обществом.¹⁴ Вместо того чтобы сужать концепцию плохой адаптации, сводя ее к неудачным и осложняющим ситуацию конечным результатам, формально отнесенным к понятию адаптация, советники по вопросам политики и лица, принимающие решения на различных уровнях и в широком круге учреждений, могли бы расширить тематику своих обсуждений и перейти к рассмотрению того, как избежать плохой адаптации к изменению климата уже на этапе планирования.

В докладе «Глобальное потепление на 1,5°C» также подчеркивается значимость Повестки дня Организации Объединенных Наций на период до 2030 года и провозглашенных в ней целей устойчивого развития, особенно тех, которые касаются обеспечения равенства и справедливости.¹⁴ В этом видении предстоящего решения климатических проблем основное внимание уделяется построению такого будущего, которое обеспечивает достойный образ жизни и которое будет лучше, чем то, с чем приходится сталкиваться в наши дни слишком большому числу людей. Устранение первопричин конфликтов, войн, отсутствия безопасности, нищеты и миграции является жизненно важным компонентом этого видения. Человек как биологический вид всегда приспосабливался к изменяющимся

условиям, и мы по своей природе являемся существами, способными адаптироваться. Обучение методом проб и ошибок — это надежный метод, которым можно руководствоваться в процессе адаптации. Но мы также являемся биологическим видом, который способен проявлять дальновидность и строить планы на будущее. Мы можем планировать наше будущее. Избегать плохой адаптации означает учиться не только на собственных ошибках, но и на ошибках, с которыми сталкиваются отдельные люди и общины по всему миру. Проявление дальновидности не ограничивается подозрениями, предположениями или даже устремлениями определенной группы людей, а должно основываться на научных данных и реально осуществимых вероятностях.

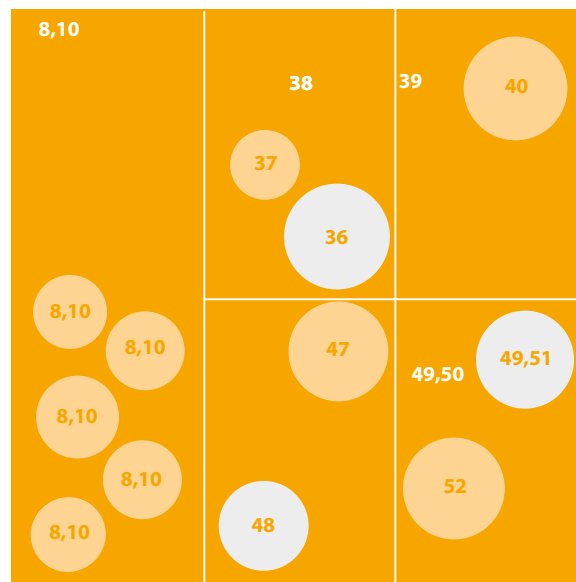
Имеющиеся фактические данные свидетельствуют о том, что плохой адаптации можно избежать путем оценки всех издержек и выгод, включая сопутствующие выгоды, для всех групп общества, а также путем четкого определения победителей и проигравших и возможности распределить связанное с этим бремя ответственности. Укоренившаяся привычка пренебрегать интересами будущих поколений не подходит ни для одного из предусмотренных МГЭИК путей удержания глобального потепления в пределах 1,5°C, которые позволят поддерживать показатели среднемировой температуры в рамках этого управляемого диапазона. Сейчас мы живем в будущем, которое было излишне обесценено во время согласования Рамочной конвенции об изменении климата в 1992 году. Избегать плохой адаптации означает не допустить безальтернативного применения углеродоемких технологий и попадания в зависимость от предыдущих решений, а вместо этого оптимизировать способность к эволюционному развитию. В противном случае, с биологической точки зрения, мы окажемся в тупике.

Список использованной литературы

1. Darwin, C.R. (1859). *On the origin of the species by means of natural selection*. London: John Murray.
2. Martínez-Padilla, J., Estrada, A., Early, R. and García-González, F. (2017). Evolvability meets biogeography: evolutionary potential decreases at high and low environmental favourability. *Proceedings of the Royal Society B*, 284(1856), 20170516. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0516>
3. Burton, I., Kates, R.W. and White, G.F. (1993). *The environment as hazard*. New York: Guilford Press.
4. Greenhill, B., Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). Exploring the adaptation-mitigation relationship: Does information on the costs of adapting to climate change influence support for mitigation? *Environmental Communication*, 12(7), 911-927. <https://doi.org/10.1080/10.1080/17524032.2018.1508046>
5. Bodansky, D. (1993). The United Nations Framework Convention on Climate Change: A commentary. *Yale Journal of International Law*, 18, 451. <https://digitalcommons.law.yale.edu/yjil/vol18/iss2/>
6. Burton, I. and van Aalst, M.K. (1999). Come hell or high water: integrating climate change vulnerability and adaptation into Bank work. Environment Department working paper No. 72, Climate change series. Washington DC: World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/212171468756566936/pdf/multi-page.pdf>
7. McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (eds.). (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press
8. Barnett, J., and O'Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change*, 2(20), 211-213. <https://www.sciencedirect.com/journal/global-environmental-change/vol/20/issue/2>
9. Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). The politics of climate change adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 317-341. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025739>
10. Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F.P. et al. (2014). Adaptation needs and options. 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, UK: Cambridge University Press. 833-868. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap14_FINAL.pdf
11. Cramer, W., Yohe, G.W., Auffhammer, M., Huggel, C., Molau, U., da Silva Dias, M.A.F. et al. (2014) Detection and attribution of observed impacts. 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, UK: Cambridge University Press. 979-1037. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
12. Anguelovski, I., Shi, L., Chu, E., Gallagher, D., Goh, K., Lamb, Z. et al. (2016). Equity impacts of urban land use planning for climate adaptation: critical perspectives from the global north and south. *Journal of Planning Education and Research*, 36(3), 333-348. <https://doi.org/10.1177%2F0739456X16645166>
13. Hayes, S. (2019). Adapting infrastructure to climate change: who bears the risk and responsibility? In *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies*. Mathew, J., Lim, C.W., Ma, L., Sands, D., Cholette, M.E. and Borghesani, P. (eds.). Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management and the 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery. Switzerland: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_24
14. 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>
15. Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. et al. (eds.). Switzerland: IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
16. Magnan, A.K., Schipper, E.L.F., Burkett, M., Bharwani, S., Burton, I., Eriksen, S. et al. (2016). Addressing the risk of maladaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(5), 646-665. <https://doi.org/10.1002/wcc.409>
17. Asian Development Bank (2018). *Bangladesh: Coastal Climate-Resilient Infrastructure Project*. Sovereign (Public) Project 45084-002. <https://www.adb.org/projects/45084-002/main>
18. International Organization for Migration (2009). Climate Change and Displacement in Bangladesh - A Silent Crisis? <https://www.iom.int/migrant-stories/climate-change-and-displacement-bangladesh-silent-crisis>
19. Kates, R.W., Colten, C.E., Laska, S., and Leatherman, S.P. (2006). Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: a research perspective. *Proceedings of the National Academy of Science*, 103(40), 14653-14660. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605726103>
20. Bleemer, Z. and van der Klaauw, W. (2017). Disaster (over-)insurance: the long-term financial and socioeconomic consequences of Hurricane Katrina. Staff Report, No. 807. New York, NY: Federal Reserve Bank of New York. https://www.newyorkfed.org/research/staff_reports/sr807
21. Orr Jr, F.M. (2003). Sequestration via injection of carbon dioxide into the deep earth. In *The Carbon Dioxide Dilemma: Promising Technologies and Policies*. National Academy of Engineering and National Research Council. Washington, DC: The National Academies Press. <https://www.nap.edu/read/10798/chapter/3#17>
22. Benson, S. M. and Orr, F. M. (2008). Carbon dioxide capture and storage. *MRS bulletin*, 33(4), 303-305. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.63>
23. Huppert, H.E. and Neufeld, J.A. (2014). The fluid mechanics of carbon dioxide sequestration. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 255-272. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-011212-140627>

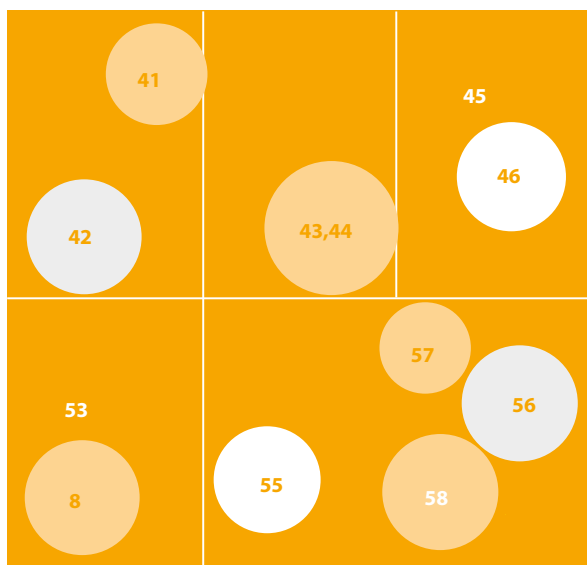
24. Weissman, S. (2016). Natural Gas as a Bridge Fuel – Measuring the Bridge. Center for Sustainable Energy, San Diego. http://energycenter.org/sites/default/files/docs/nav/policy/research-and-reports/Natural_Gas_Bridge_Fuel.pdf
25. Howarth, R.W., Santoro, R., and Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change*, 106(4), 679. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5>
26. United Nations Conference on Trade and Development (2018). Commodities at a glance. *Special Issue on Shale Gas 9*. New York and Geneva: UNCTAD. https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2017d10_en.pdf
27. Chen, H. and Carter, K.E. (2016). Water usage for natural gas production through hydraulic fracturing in the United States from 2008 to 2014. *Journal of Environmental Management*, 170, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.023>
28. U.S. EPA. (2016). Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States. United States Environmental Protection Agency/Office of Research and Development, Washington, DC. EPA/600/R-16/236Fa. <https://cfpub.epa.gov/ncea/hfstudy/recordisplay.cfm?deid=332990>
29. Drollette, B.D., Hoelzer, K., Warner, N.R., Darrah, T.H., Karatum, O., O'Connor, M.P., Nelson, R.K. et al. (2015). Elevated levels of diesel range organic compounds in groundwater near Marcellus gas operations are derived from surface activities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 112(43), 13184-13189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1511474112>
30. Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R. and Currie, B.S. (2015). Earthquakes Induced by Hydraulic Fracturing in Poland Township, Ohio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 189-197. <https://doi.org/10.1785/0120140168>
31. Elliot, T.R. and Celia, M.A. (2012). Potential restrictions for CO2 sequestration sites due to shale and tight gas production. *Environmental Science & Technology*, 46(7), 4223-4227. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2040015>
32. Moriarty, P. and Honnery, D. (2018). Energy policy and economics under climate change. *AIMS Energy*, 6(2): 272-290. <https://doi.org/10.3934/energy.2018.2.272>
33. Jackson, R.B., Vengosh, A., Darrah, T.H., Warner, N.R., Down, A., Poreda, R.J., Osborn, S.G., Zhao, K. and Karr, J.D. (2013). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28), 11250-11255. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221635110>
34. Omara, M., Sullivan, M.R., Li, X., Subramanian, R., Robinson, A.L. and Presto, A.A. (2016). Methane Emissions from Conventional and Unconventional Natural Gas Production Sites in the Marcellus Shale Basin. *Environmental Science & Technology*, 50, 2099-2107. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05503>
35. Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R. and Jackson, R.B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8172-8176. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108>

Список использованных графических материалов



36. Hartmann, I., Sugulle, A.J. and Awale, A.I. (2010). The Impact of Climate Change on Pastoralism in Salahley and Bali-gubadle Districts, Somaliland. Heinrich Böll Stift ung, East and Horn of Africa, Nairobi. https://ke.boell.org/sites/default/files/the_impact_of_climate_change_on_pastoralism_in_salahley_and_bali-gubadle_districts_-_somaliland.pdf
37. Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. and Guo, R. (2015). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6, pages 166-171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
38. IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
39. WWAP (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
40. Tellman, B., Bausch, J.C., Eakin, H., Anderies, J.M., Mazari-Hiriart, M., Manuel-Navarrete, D. and Redman, C.L. (2018). Adaptive pathways and coupled infrastructure: seven centuries of adaptation to water risk and the production of vulnerability in Mexico City. *Ecology and Society*, 23(1):1. <https://doi.org/10.5751/ES-09712-230101>

ПЛОХАЯ АДАПТАЦИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА: КАК НЕ ПОПАСТЬ В ЗАПАДНЮ НА ПУТИ СОХРАНЕНИЯ СПОСОБНОСТИ К ЭВОЛЮЦИОННОМУ РАЗВИТИЮ



41. Czajkowski, J., Engel, V., Martinez, C., Mirchi, A., Watkins, D., Hughes, J., Sukop, M. (2015). Economic impacts of urban flooding in south Florida: Potential consequences of managing groundwater to prevent salt water intrusion. Working paper no. 2015-10, Risk Management and Decision Processes Center, University of Pennsylvania. http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/WP201510_GWLevelsFloodClaims_Czajkowski-et-al.pdf
42. Finkbeiner, E.M., Micheli, F., Bennett, N.J., Ayers, A.L., Le Cornu, E. and Doerr, A.N. (2017). Exploring trade-offs in climate change response in the context of Pacific Island fisheries. *Marine Policy*, 88, 359-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2017.09.032>
43. Limthongsakul, S., Nitivattananon, V. and Arifwidodo, S.D. (2017). Localized flooding and autonomous adaptation in peri-urban Bangkok. *Environment and Urbanization*, 29(1), 51-68. <https://doi.org/10.1177/0956247816683854>
44. Marks, D. (2015). The Urban Political Ecology of the 2011 Floods in Bangkok: The Creation of Uneven Vulnerabilities. *Pacific Affairs*, 88(3), 623-651. <http://dx.doi.org/10.5509/2015883623>
45. Jolly, W.M., Cochrane, M.A., Freeborn, P.H., Holden, Z.A., Brown, T.J., Williamson, G.J. and Bowman, D.M. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6:7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
46. Little, J. B. (2018) Fighting Fire with Fire: California Turns to Prescribed Burning. Yale Environment 360. Yale School of Forestry & Environmental Studies. <https://e360.yale.edu/features/fighting-fire-with-fire-california-turns-to-prescribed-burning>
47. Zinyemba, C., Archer, E. and Rother, H-A. (2018). Climate variability, perceptions and political ecology: Factors influencing changes in pesticide use over 30 years by Zimbabwean smallholder cotton producers. *PLoS ONE*, 13(5): e0196901. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196901>
48. Pires, G.F., Abrahão, G.M., Brumatti, L.M., Oliveira, L.J.C., Costa, M.H., Liddicoat, S. and Ladle, R.J. (2016). Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228: 286-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>
49. Bett, B., Kiunga, P., Gachohi, J., Sindato, C., Mbotha, D., Robinson, T., Lindahl, J. and Grace, D. (2017). Effects of climate change on the occurrence and distribution of livestock diseases. *Preventive Veterinary Medicine*, 137, Part B, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.11.019>
50. UNEP (2016). UNEP Frontiers 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. www.unenvironment.org/frontiers
51. UNEP (2017). Frontiers 2017: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://www.unenvironment.org/frontiers>
52. Hammer, T.J., Fierer, N., Hardwick, B., Simojoki, A., Slade, E., Taponen, J., Viljanen, H. and Roslin, T. (2016). Treating cattle with antibiotics affects greenhouse gas emissions, and microbiota in dung and dung beetles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283:20160150. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.0150>
53. UN (2014). World Urbanisation Prospects: the 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). Department of Economic and Social Affairs. Population Division, New York: United Nations.
54. Ford, J.D., Labbé, J., Flynn, M., Araos, M. and IHACC Research Team (2017). Readiness for climate change adaptation in the Arctic: a case study from Nunavut, Canada. *Climatic Change*, 145(1-2), 85-119. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2071-4>
55. Lei, Y., Finlayson, C.M., Thwaites, R., Shi, G. and Cui, L. (2017). Using Government Resettlement Projects as a Sustainable Adaptation Strategy for Climate Change. *Sustainability*, 9, 1373. <https://doi.org/10.3390/su9081373>
56. O'Hare, P., White, I. and Connelly, A. (2016). Insurance as maladaptation: Resilience and the 'business as usual' paradox. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 34(6), 1175-1193. <https://doi.org/10.1177/0263774X15602022>
57. Bryant, C.R., Bousbaine, A.D., Akkari, C., Daouda, O., Delusca, K., Épule, T.E. and Drouin-Lavigne, C. (2016). The roles of governments and other actors in adaptation to climate change and variability: The examples of agriculture and coastal communities. *AIMS Environmental Science*, 3(3), 326-346. <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.3.326>
58. ILO (2016). Labour Mobility and Regional Climate Adaptation. International Labour Organization Technical Note https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---migrant/documents/publication/wcms_534341.pdf





В 2016 году Программа ООН по окружающей среде приступила к публикации новой серии ежегодных докладов — *Передовые рубежи: намечающиеся проблемы, имеющие экологическое измерение*. В этом докладе выявляется и осмысливается широкий спектр вновь возникающих вопросов в области охраны окружающей среды, которые требуют внимания и действий правительств, заинтересованных сторон, лиц, принимающих решения, а также широкой общественности. Первый выпуск — *Передовые рубежи 2016 года* — был посвящен следующим шести намечающимся проблемам:

- Финансовый сектор: ключевой элемент продвижения устойчивого развития
- Зоонозы: размываемые линии между вновь возникающими болезнями и здоровым состоянием экосистем
- Микрочастицы пластмасс: нарушение пищевой цепи
- Утрата и ущерб: неизбежные результаты воздействия изменения климата на экосистемы
- Чаша с ядом: накопление токсинов в сельскохозяйственных культурах в эпоху изменения климата
- Экзотическое потребление: незаконная торговля живыми животными



В докладе *Передовые рубежи 2017 года* представлены следующие намечающиеся проблемы:

- Устойчивость к противомикробным веществам: исследование экологических аспектов
- Наноматериалы: применение принципа предосторожности
- Морские природоохранные зоны: обеспечение эффективного использования во имя устойчивого развития
- Песчаные и пыльные бури: преодоление последствий глобального явления
- Гелиоэнергетические системы: удовлетворение спроса на энергию в неэлектрифицированных населенных пунктах
- Перемещение населения по экологическим причинам: мобильность человека в эпоху антропоцена

unenvironment.org/frontiers



**Программа Организации
Объединённых Наций по
окружающей среде**

United Nations Avenue, Gigiri
P O Box 30552, 00100 Nairobi, Kenya
Tel +254 20 7621234 | publications@unenvironment.org
www.unenvironment.org

