

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОРАЛЛОВЫХ РИФОВ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НЫНЕШНИХ МЕТОДОВ, НЕУДАЧ И БУДУЩИХ НАПРАВЛЕНИЙ

Lisa Boström-Einarsson<sup>1</sup>, Russell Babcock<sup>2</sup>, Elisa Bayraktarov<sup>3</sup>, Daniela Ceccarelli<sup>4</sup>,  
Nathan Cook<sup>5</sup>, Sebastian C.A. Ferrel<sup>6,7</sup>, Boze Hancock<sup>8</sup>, Peter Harrison<sup>9</sup>, Margaux Heim<sup>2</sup>,  
Elizabeth Shaver<sup>9</sup>, Adam Smith<sup>6</sup>, David Suggett<sup>10</sup>, Phoebe J. Stewart-Sinclair<sup>4</sup>,  
Tali Vardi<sup>11</sup>, Ian M. McLeod<sup>2</sup>

(Исследовательская статья, 30 января 2020 г.)

## CORAL RESTORATION – A SYSTEMATIC REVIEW OF CURRENT METHODS, SUCCESSES, FAILURES AND FUTURE DIRECTIONS

PLOS One<sup>12</sup>

### Резюме

*Экосистемы коралловых рифов столкнулись с беспрецедентной потерей жестких кораллов, формирующих среду обитания кораллов в последние десятилетия. В то время как морские охраняемые территории исторически были сосредоточены на пассивной защите среды обитания, потребность и интерес к активному восстановлению рифов в последние десятилетия. Однако нестыковка во мнениях между специалистами по восстановлению коралловых рифов, ответственными руководителями систем управления коралловыми рифами и научным сообществом привела к отсутствию последовательности, когда оказалось трудно получить реальную картину имеющихся знаний. Для решения этой проблемы авторы нацелились на синтез имеющихся знаний в рамках всеобъемлющего глобального обзора по методам восстановления коралловых рифов, с*

---

<sup>1</sup> Центр исследований тропических вод и водных экосистем, университет Джеймса Кука, Таунсвилл, шт. Квинсленд, Австралия.

<sup>2</sup> Научно-промышленная исследовательская организация Содружества (CSIRO), Брисбен, шт. Квинсленд.

<sup>3</sup> Университет штата Квинсленд, Брисбен.

<sup>4</sup> Консультант по вопросам морской экологии, остров Магнетик, шт. Квинсленд.

<sup>5</sup> Экология рифов, университет Джеймса Кука, Таунсвилл, шт. Квинсленд.

<sup>6</sup> Центр тропических морских исследований им. Лейбница (ZMT), Бремен, Германия.

<sup>7</sup> Кафедра морской экологии, факультет биологии и химии (FB2), университет Бремена.

<sup>8</sup> Комитет по охране природы, Арлингтон, шт. Виргиния, США.

<sup>9</sup> Университет Саутерн Кросс, Лисмор, шт. Новый Южный Уэльс, Австралия.

<sup>10</sup> Технологический университет Сиднея.

<sup>11</sup> Исполнительный руководящий комитет Национального управления океанических и атмосферных исследований и Национальной службы морского рыболовства, научно-технологическое управление, Силвер-Спринг, шт. Мэриленд.

<sup>12</sup> Международный междисциплинарный рецензируемый научный журнал с открытым доступом для публикаций, который публикует научные исследования и обзоры в сфере естественных и медицинских наук. Основан в 2006 г. некоммерческой организацией Public Library of Science (Общественная научная библиотека).

включением внеиздательской литературы и с проведением обследования практических специалистов по восстановлению коралловых рифов. Авторы выявили, что среди конкретных исследований доминировали краткие по времени проекты, и в 60% всех проектов сообщалось, что мониторинг восстановленных участков проводился менее 18 месяцев. Подобным образом, большинство проектов были относительно небольшими в пространственном масштабе, со средним размером восстановленной площади 100 м<sup>2</sup>. В наборе данных представлен разнообразный диапазон видов, с 229 различными видами из 72 родов. В общем, проекты восстановления коралловых рифов были сосредоточены главным образом на быстро растущих ветвистых кораллах (59% исследований), доля выживших была от 60 до 70%. До настоящего времени относительно молодая область восстановления коралловых рифов страдает от таких же “болезней роста”, как и экологическое восстановление в других экосистемах. Они включают 1) отсутствие четких и достижимых целей; 2) отсутствие надлежащего и стандартизованного мониторинга и отчетности; (3) плохо спланированные проекты в отношении заявленных целей. Минимизация этих проблем имеет ключевое значение для успешного масштабирования проектов и для сохранения доверия общественности восстановлению как инструменту для управления на основе устойчивости. И наконец, в то время как очевидно, что специалисты-практики разработали эффективные методы для успешного выращивания кораллов в небольших масштабах, в настоящее время важно рассмотреть восстановление как замену значимому действию по изменению климата.

## Вместо предисловия

Коралловые рифы – известковые органогенные геологические структуры, образованные колонизальными коралловыми полипами<sup>13</sup> и некоторыми видами водорослей, способными извлекать известь из морской воды (“биогермы”). Образуются на мелководье в тропических морях.

Согласно данным ООН, 70% всех коралловых рифов на Земле находится под угрозой; 20% уже полностью уничтожены без надежды на восстановление, 24% подвергаются неминуемой опасности обрушения и еще 26% рискуют прекратить свое существование в связи с долгосрочными угрозами<sup>14</sup>.

Рифовые структуры защищают жителей прибрежных зон от штормовых волн, служат источником песка для пляжей и приносят местным коммерческим структурам колоссальные доходы в сфере туризма и отдыха. Их можно также назвать аптекой 21 века. Бесчисленное множество организмов, включая губки, кораллы и аплизии<sup>15</sup>, содержат молекулы, обладающие мощным противовоспалительным, противовирусным, противоопухолевым и/или антибактериальным действием.

---

<sup>13</sup> Коралловые полипы – класс морских беспозвоночных из типа стрекающих (Cnidaria). Колониальные и одиночные донные организмы. Многие виды коралловых полипов обладают известковым скелетом и участвуют в рифообразовании. Насчитывают около 6 тыс. видов. Большинство коралловых полипов населяют теплые тропические моря, где температура воды не опускается ниже +20°C, и на глубинах не более 20 м, в условиях обильного планктона, которым они питаются.

<sup>14</sup> United Nations Department of Public Information, “Life below water: why it matters”, 2016. Available from: [http://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2016/08/14\\_W...](http://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2016/08/14_W...)

<sup>15</sup> Аплизия – один из крупнейших представителей заднежаберных моллюсков, называемых также морским зайцем.

*Масштабная гибель экосистем коралловых рифов представляет собой также социально-экономическую проблему*<sup>16</sup>. По данным ООН, коралловые рифы обеспечивают товары и услуги на сумму не менее 11,9 трлн. долл. в год (для сравнения, ВВП России в 2019 г. составил 4,39 трлн. долл.)

## Введение

Экосистемы коралловых рифов столкнулись с беспрецедентной потерей жестких кораллов, формирующих среду обитания кораллов в последние десятилетия [1 – 5]. Рифы подвержены воздействию ряда хронических и острых антропогенных нарушений, включая ухудшение качества воды, разрушительные методы рыболовства, чрезмерный вылов коралловых рифовых рыб<sup>17</sup> и нашествие коралловых хищников и болезней кораллов; однако в последние десятилетия изменение климата стало основной угрозой для коралловых рифов [2, 6 – 8]. На этом было акцентировано внимание в течение недавней глобальной тепловой морской волны<sup>18</sup> 2016-17 гг., которая привела к самому интенсивному явлению обесцвечивания коралловых рифов<sup>19</sup> за всю историю, включая отдаленные и девственные коралловые рифы [9, 10]. В то время как динамические системы типа коралловых рифов имеют врожденную способность к естественному восстановлению [11, 12], частота, интенсивность и опасность массового обесцвечивания коралловых рифов и экстремальные погодные условия возрастают [13, 14], уменьшается время и способность к восстановлению между катастрофическими событиями [15]. Кроме того, поставка личинок, колонизация и пополнение личинок кораллов<sup>20</sup> [16 – 18] и выживание после колонизации часто нарушается из-за хронических или повторяющихся воздействий внешних факторов [19 – 22]. Отсутствие естественного пополнения и недостаток времени для восстановления между возмущающими событиями приводит к тому, что естественное

---

<sup>16</sup> Biliana Cicin-Sain, “Goal 14- Conserve and Sustainability Use Oceans, Seas and Marine Resources for Sustainable Development”, *UN Chronicle*, vol LI No4 (2014). Available from: <https://unchronicled.un.org/article/goal-14-conserve-and-sustainable-use-oceans-seas-and-marineresources-sustainable>.

<sup>17</sup> Рифовые рыбы – рыбы, которые живут или тесно связаны с коралловыми рифами. Хотя коралловые рифы занимают менее 1% площади поверхности Мирового океана, они являются местом обитания 25% из всех видов морских рыб. Большинство рыб, обитающих на коралловых рифах, принадлежит к классу лучеперых, с характерными костяными лучами и шипами в плавниках. В коралловых рифах Мирового океана обитают 6000 – 8000 видов рыб. Помимо рыб, в коралловых рифах обитают съедобные беспозвоночные: моллюски, голотурии, крабы, креветки, лангусты, полихеты, ежи.

<sup>18</sup> Морская тепловая волна – период нетипично высоких температур для определенного региона океана или сезона температур, который длится пять или более дней. Это может быть смертельно опасно для многих морских видов – кораллов, водорослей, устриц, рыб и микроорганизмов.

<sup>19</sup> Обесцвечивание кораллов – биологический процесс, связанный в первую очередь с изменением климата. При повышении среднегодовых температур меняются жизненные условия микроводорослей, живущих в симбиозе с кораллами. Под действием токсичных элементов, которые выделяют эти водоросли, обесцвечивается “скелет” кораллового рифа.

<sup>20</sup> Кораллы размножаются почкованием или половым путем. Полипы, как правило, раздельнополюе. Обычно в ходе эмбрионального развития образуются миниатюрные свободноплавающие личинки – планулы, через некоторое время оседающие на дне и дающие начало новым особям или колониям.

восстановление становится маловероятным или невозможным во многих местах. Борьба с потерей сред обитания на многих уровнях, вероятно, является основной проблемой для экологов и администраторов в эпоху антропоцена<sup>21</sup>, что приводит к возрастанию мотивации и интереса к вмешательствам, которые могут повысить устойчивость рифов или помочь в сохранении и восстановлении структуры и функций коралловых рифов [23, 24].

До недавнего времени для морских охраняемых территорий предпочтение отдавали пассивной защите среды обитания вместо восстановления. Однако недавние исследования показали, что оптимальные результаты охраны окружающей среды должны включать как защиту среды обитания, так и ее восстановление [25]. Восстановление является обычной практикой в наземных экосистемах, и это признанный элемент управления прибрежными средами обитания, такими как водно-болотные угодья [26] и окаймляющие рифы<sup>22</sup> [27 – 29], но по-прежнему продолжают споры о коралловых рифах как в академических кругах, так и среди тех, кто занимается вопросами морской прибрежной среды. Критики восстановления коралловых рифов заявляют, что: (1) восстановление коралловых рифов отвлекает внимание от вопросов смягчения изменения климата и других угроз морской окружающей среде; [9, 30]; (2) это бесполезно, если нельзя восстановить рифы в масштабе экосистемы [31]. Защитники восстановления коралловых рифов возражают: (1) вмешательства могут служить для защиты кораллового биоразнообразия в краткосрочной перспективе, в то время вступает в силу смягчение крупномасштабных угроз, таких как изменение климата и ухудшение качества воды [24] (2) оно необходимо для восстановления находящихся под угрозой исчезновения или редких видов коралловых рифов, таких как *Acropora palmata*<sup>23</sup> и *A. cervicornis*<sup>24</sup>, например, в Карибском бассейне, где нарушено естественное поддержание популяции [32 – 34]; (3) улучшится ситуация с охраной окружающей среды и заинтересованность в защите коралловых рифов путем вовлечения местных сообществ в проекты восстановления [35 – 39]. Прогнозируется, что глобальная температура будет возрастать еще несколько десятилетий даже и в случае сценария нулевых углеродных выбросов [40, 41]. Таким образом, эффективные меры по восстановлению на местном уровне потенциально могут позволить преодолеть временный разрыв между крупномасштабными действиями по борьбе с изменением климата и существенным эффектом запаздывания для косвенных управленческих действий. С учетом того, что поврежденные рифы, вероятно, пострадают от сокращения генетического разнообразия из-за крупномасштабных нарушений в течение этого периода [42 – 44], сохранение видов кораллов и генетического разнообразия посредством активного восстановления может позволить “выиграть время” для восстановления после исправления или устранения факторов экологического стресса.

---

<sup>21</sup> Антропоцен – неформальный геохронологический термин, обозначающий геологическую эпоху с уровнем человеческой активности, воздействующей на дикую природу и играющей существенную роль в экосистеме Земли.

<sup>22</sup> Окаймляющие рифы (береговые рифы) – разновидность коралловых рифов, образующихся на внешней части прибрежной отмели.

<sup>23</sup> Коралл Эпхорн (оленерогий коралл) – важный коралловый риф, имеющий сложное строение с множеством ветвей, напоминающий рога оленя.

<sup>24</sup> Стагхорн коралл – разветвленный каменистый коралл с цилиндрическими ветвями длиной от нескольких см до двух метров в длину и высоту.

Несмотря на широко распространенные заповедники (в частности, в научном сообществе), активное восстановление кораллов все чаще используется как инструмент для восстановления коралловых рифов в местном масштабе, особенно для туристической отрасли [32, 45- 48]. Однако вследствие неудовлетворительной связи и сотрудничества между практическими специалистами в области восстановления рифов, управляющими компаниями в этом секторе и учеными, значительная часть работ по восстановлению коралловых рифов до настоящего времени проводилась в условиях малого научного вклада или без такового, или без подробного мониторинга. Поэтому значительная доля проектов и методов по восстановлению коралловых рифов не была документально представлена в научной литературе. Небольшое количество документации, недостаточная координация и обмен знаниями снижают наши возможности учиться на прошлых успехах и неудачах, и возрастает риск повторного тестирования сходных методов и гипотез. Для противодействия этому авторы решили синтезировать имеющиеся знания в рамках всестороннего глобального обзора методов восстановления коралловых рифов. Авторы расширили сбор данных в рамках поисков в научной литературе с использованием источников за пределами традиционных научных кругов, у напрямую специализированных практиков в области восстановления в режиме интернет-опроса и получили доступ к онлайн-источникам для выяснения конкретных подробностей о методах восстановления и новых разработках. Цель состояла в проведении систематического обзора нынешних методов восстановления коралловых рифов, с акцентированием внимания на общих проблемах и потенциальных проблемных областях, и идентификации пробелов в знаниях. В дополнение к этому обзору авторы создали интерактивную онлайн-базу данных, которая использовалась как ресурс для практических специалистов по восстановлению коралловых рифов, управляющих компаний в этой области и ученых ([доступ здесь](#)), участвующих в создании документа. Все вместе эти три выхода (обзор, [база данных](#) и [наглядное представление](#)) стали основой нынешнего состояния знаний о глобальных подходах к восстановлению, для информирования о будущих направлениях исследований и улучшения восстановления коралловых рифов.

## Методы

Авторы собрали конкретные исследования и описания методов восстановления коралловых рифов из четырех источников: (1) первоисточников (т.е. опубликованной рецензированной научной литературы); (2) издательской литературы (например, научные доклады и технические резюме экспертов в данной области); (3) данные, полученные в интерактивном режиме (например, блоги и проекты с онлайн видео описанием); (4) онлайн-исследование, нацеленное на специалистов-практиков в области восстановления (doi:10.5601/dryad.p638160). Авторы включили только те конкретные исследования, в которых проводилось активное восстановление коралловых рифов (т.е. по крайней мере, была включена одна стадия жизненного цикла мадрепоровых кораллов<sup>25</sup>). Они исключили косвенные проекты восстанов-

---

<sup>25</sup> Мадрепоровые, или каменные кораллы – отряд коралловых полипов из подкласса шестилучевых кораллов. Составляют самый обширный таксон Anthozoa, включающий около 3600 видов.

ления коралловых рифов, такие как смягчение последствий возмущающих воздействий (например, удаление рыб-хищников, контроль заболеваний и т.д.) и пассивные вмешательства для восстановления (например, правоприменительные меры по борьбе с рыболовством с использованием динамита или улучшение качества воды). Исключены были также многие искусственные рифы, в частности, если цель состояла в улучшении работы рыболовной отрасли (т.е. устройства концентрации рыбы – рыбонаправляющие устройства), или если коралловые рифы не были включены в метод. В меру своих возможностей авторы старались избежать дублирования конкретных исследований по четырем отдельным источникам, так что каждый случай в обзоре и базе данных представлял отдельный проект.

Более 40 отдельных категорий было зарегистрировано из каждого конкретного исследования и введено в базу данных. Они включают данные об: (1) источниках информации; (2) особенностях конкретного исследования (например, местоположение, длительность, пространственный масштаб, цели и т. д.); (3) конкретных подробностях о методах; (4) подробностях о рифах (например, род, виды, морфология); (5) подробностях мониторинга; (6) результатах и выводах (S2 File). В то время как этот расширенный поиск дал возможность авторам избежать систематической ошибки вследствие ограниченной опубликованной литературы, авторы осознают, что использование источников, которые не подвергались строгому рецензированию, потенциально порождает систематическую ошибку. Многие правительственные отчеты подвергаются неформальному рецензированию; однако результаты обследования и онлайн-описания могут представлять субъективную оценку результатов восстановления. Для уменьшения субъективности оценки исследованных случаев авторы решили не интерпретировать результаты опроса или ответы, полученные в опросе, а записывали только то, что было явно указано в каждом документе [49, 50].

## Первоисточники

Авторы использовали много поисковых систем с целью получения самого полного охвата научной литературы. Во-первых, они проводили поиск научной литературы с использованием Google Scholar<sup>26</sup> с ключевыми словами “кораллы + восстановление”. Поскольку область (и поэтому результаты поиска) характеризовалась доминированием пересадки кораллов<sup>27</sup>. Этот поиск затем был дополнен отдельными поисками других общих методов с использованием сочетания “кораллы + восстановление” + [наименование метода]. Затем поиск был дополнен с использованием тех же самых ключевых слов в ISI Web of Knowledge<sup>28</sup> (результативность поиска  $n = 738$ ).

---

<sup>26</sup> Академия Гугл- бесплатная поисковая система по полным текстам научных публикаций всех форматов и дисциплин, работающая с 2004 г. Включает данные из большинства рецензируемых онлайн-журналов крупнейших научных издательств Европы и Америки.

<sup>27</sup> Пересадка, или трансплантация кораллов – пересадка обломков коралловых рифов на поврежденные кораллы. Через 3 месяца пересаженные части полностью приживаются, а спустя 4 года вырастают полноценные кораллы.

<sup>28</sup> Поисковая интернет-платформа, объединяющая реферативные базы данных публикаций в научных журналах и патентов, в том числе базы, учитывающие взаимное цитирование публикаций. Начало работы – 2016 г.

### Термины для методов восстановления, используемые в обзоре, их определения и другие общие термины

Категории не являются взаимоисключающими, так как некоторые методы часто комбинируются

Метод	Определение	Другие общие термины
	Методы бесполого размножения	
Прямая трансплантация (пересадка)	Пересадка коралловых колоний или фрагментов без промежуточной стадии отращивания	Переломный момент в судьбе коралловых рифов, восстановление после шока
Выращивание кораллов	Пересадка коралловых фрагментов после промежуточной стадии отращивания	Рост популяции, бесполое размножение <sup>29</sup>
Выращивание кораллов, стадия отращивания	Пересадка коралловых фрагментов с промежуточной стадией отращивания (используется для описания конкретных исследований только с подробностями о стадии отращивания). Питомники могут быть на месте (на рифах) или вне (поток через аквариум). Следует отметить, что в результате упомянутого определения восстановления стадия отращивания не является восстановлением, если только не происходит пересадка	
Выращивание кораллов – стадия трансплантации	Пересадка коралловых фрагментов с промежуточной стадией отращивания, включая пересадку молодых особей, выращиваемых в питомнике (используется для описания конкретных исследований с подробностями только для стадии трансплантации)	Пересадка
Выращивание кораллов – микро фрагментация	Пересадка микро фрагментов коралловых рифов, с промежуточной стадией отращивания	Восстановление внешней поверхности
	Методы полового размножения	
Увеличение темпов роста личинок	Использование личинок в результате полового размножения для распространения или пересадки на участке восстановления, после промежуточной стадии выдерживания, которая может быть по месту или вне	Размножение личинок (планул), половое размножение, засев личинок, селекция

<sup>29</sup> В некоторых географических местностях (главным образом в Карибском бассейне вследствие концентрации внимания на восстановлении видов, находящихся под угрозой исчезновения) восстановление коралловых рифов синонимично выращиванию кораллов (например, Hope Coral Reef Replenishment Manual, Bowden-Kerby, 2014).

Метод	Определение	Другие общие термины
Добавление нижнего слоя – искусственный риф	Методы улучшения приживания нижнего слоя Добавление искусственных структур с целью восстановления кораллового рифа	Сконструированные/искусственные структуры, различные фирменные марки (например, BioRock <sup>30</sup> , EcoReef <sup>31</sup> , ReefBall <sup>32</sup> , MatsSpiders <sup>33</sup> )
Стабилизация нижнего слоя	Стабилизация нижнего слоя для облегчения пополнения или восстановления кораллового рифа (часто в сочетании с искусственными рифами и пелесадкой коралловых фрагментов)	
Улучшение приживания нижнего слоя с помощью электрического поля	Улучшение приживания искусственного нижнего слоя с помощью электрического поля или постоянного тока	Электрохимически создаваемые структуры, образование минерала, BioRock (см. сноску 30)
Улучшение приживания нижнего слоя с помощью удаления водорослей	Улучшение приживания нижнего слоя путем удаления морских водорослей	

<sup>30</sup> Торговая марка вещества, образующегося при электроаккумуляции минералов, растворенных в морской воде. Процесс разработан и запатентован в 1979 г.

<sup>31</sup> Плоские керамические камни различных размеров и форм, которые продаются в “живом состоянии”, выдержанные в рифовых водах не менее 4 месяцев.

<sup>32</sup> Искусственные рифы, предназначенные для восстановления подводных биоценозов, повышения их продуктивности.

<sup>33</sup> Метод, разработанный в 2011 г., основанный на установке непрерывной сети из “коралловых пауков” – стали с гексагональным профилем, покрытой песком, с прикрепленными фрагментами кораллов, которая покрывает области коралловых обломков и промежутки между оставшимися живыми кораллами на рифе.





Рисунок 1. Местоположение конкретных исследований по восстановлению коралловых рифов, включенных в обзор.

Конкретные исследования восстановления проводятся в 56 странах, и в большинстве стран имеются значительные площади коралловых рифов, в которых было проведено, по крайней мере, одно исследование. Точки с данными раскрашены по странам

Пояснения к рисунку 1: United States – США, China – Китай, India – Индия, Australia – Австралия, Number of case studies – количество конкретных исследований

Затем в ручном режиме отбирали исследования, которые соответствовали критериям для активного восстановления коралловых рифов, как описано выше (конечный поиск  $n = 221$ ). В тех случаях, когда в одной статье описывалось несколько разных проектов или методов, их разбивали на отдельные конкретные исследования. И наконец, принимали во внимание предыдущие обзоры по восстановлению коралловых рифов для получения конкретных исследований из перечня выполненных проектов.

### **Внеиздательская литература**

В то время как многие отчеты были выявлены в результате литературных поисков Google Scholar (см. сноску 26), авторы также приняли во внимание базу данных The Nature Conservancy (TNC) с отчетами о проектах восстановления на побережье Северной Америки (<http://projects.tnc.org/coastal/>). Это было дополнено отчетами, перечисленными в списке использованной литературы с другими статьями, отчетами и обзорами и в течение интернет-опросов ( $n = 30$ ).

### **Данные, полученные в интерактивном режиме**

Проекты небольшого масштаба, проводимые без существенных исходных данных от исследователей, научных кругов, неправительственных организаций (НПО) или управляющих компаний в области коралловых рифов, часто не содержат результатов в виде официальных письменных отчетах о методах. Для оценки этой информации авторы провели онлайн-обследования с использованием поисковых систем YouTube<sup>34</sup>, Facebook и Google, используя термины для поиска “восстановление коралловых рифов”. Авторы пользовались информацией, представленной в форме видео, блог-постов и веб-сайтов для описания дополнительных проектов ( $n = 48$ ). Вследствие непроверенного характера такой отчетности авторы имели ограниченный сбор данных из интерактивных опросов, по сравнению с рецензируемой литературой и обследованиями. Как минимум, в этот обзор были включены данные о местоположении, использованных методах и результатах отчетов или усвоенных уроков.

### **Онлайн-обследование**

Для доступа к информации о проектах, которые не были опубликованы, авторы запланировали провести онлайн-обследование, нацеленное на специалистов-практиков в области восстановления коралловых рифов. В ходе обследования (опроса) задавали 25 вопросов практическим специалистам в области восстановления в отношении проводимых ими проектов ([S1 File](#)) в рамках JSU human ethics H7218<sup>35</sup> (вслед за Национальным заявлением правительства Австралии об этическом поведении при исследовании человека от 2007 г.) Эти данные ( $n = 63$ ) были включены во все расчеты в этом обзо-

---

<sup>34</sup> Видеохостинг, предоставляющий пользователям услуги хранения, доставки и показа видео, владельцем которого является компания Google.

<sup>35</sup> Комитет по соблюдению принципов человеческой этики при проведении исследований на человеке при университете Джеймса Кука в Таунсвилле, шт. Квинсленд, Австралия.

ре, но их нет в открытом доступе для сохранения анонимности участников. Хотя авторы предлагали участникам сделать отдельное обследование для каждого конкретного исследования, возможно, что участники включали несколько отдельных проектов в одно обследование, что могло привести к уменьшению реального количества сообщенных конкретных исследований.

### Анализ данных

Вследствие высокой разнородности информации, имеющейся в таком разном наборе источников, авторы исключили выполнение количественного статистического мета-анализа. Вместо этого был проведен качественный обзор с использованием сводной статистики для оценки и сопоставления результатов различных методов восстановления. Процентные значения, численные показатели и другие количественные данные из базы данных относятся к общему количеству конкретных исследований с данными в определенной категории. Конкретные исследования, в которых отсутствовали данные для определенной категории, либо отсутствовали соответствующие подробности (например, обобщенные “разнородные” данные о роде кораллов) не были включены в расчеты. Для нескольких категорий было возможно несколько ответов (например, количество видов кораллов *n*). По этой причине абсолютное количество могло превышать количество конкретных исследований в базе данных. Однако процентные значения отражают долю конкретных исследований в каждой категории. Авторы использовали шесть целей, которые были предложены в работе [51] для классификации цели каждого конкретного исследования:

(1) ускорение восстановления коралловых рифов после воздействия внешних факторов; (2) восстановление самоподдерживающейся, функционирующей экосистемы коралловых рифов;

(3) Смягчение негативных воздействий потерь коралловых рифов перед известным воздействием внешних факторов; (4) Уменьшение снижения популяции и деградации экосистемы; (5) Предоставление альтернативных, устойчивых возможностей существования; (6) Содействие бережному отношению к защите природы, с двумя дополнительными категориями: (7) научные исследования; (8) экологическое проектирование.

Авторы использовали таблицу для визуализации и анализа базы данных (Desktop Professional Edition, version 10.5, Tableau Software<sup>36</sup>). Обеспечена доступность данных в соответствии с руководящими принципами FAIR<sup>37</sup> для обработки и управления данными [52].

### Определение восстановления

Международная рабочая группа по науке и политике Общества охраны природы<sup>38</sup> [53] определяет **восстановление** как “процесс оказания помощи в восстановлении экосистемы, которая деградировала, была повреждена или разрушена”. Далее “восстановление – это попытка вернуть экосистему к ее

---

<sup>36</sup> Комплексное программное обеспечение для управления рабочим столом.

<sup>37</sup> Данные, которые соответствуют принципам поиска, доступности, функциональной совместимости и возможного повторного использования.

<sup>38</sup> Природоохранная организация, основанная в 1988 г., со штаб-квартирой в Вашингтоне.

исторической траектории”. В идеальном случае требуется, чтобы проекты восстановления не требуют обслуживания, когда они завершены. В настоящее время для коралловых рифов термин восстановление используется для охватывания как “восстановления”, так и “реабилитации”; в последнем случае с подчеркиванием “восстановления экосистемных процессов, продуктивности и услуг...” без значения возврата к ранее существовавшим биотическим условиям, и часто требуется некоторое обслуживание. **Восстановленная экосистема** “обладает значительными биотическими и абиотическими ресурсами для продолжения ее развития без дальнейшей помощи или субсидий”.

Эти определения проливают свет на одно из фундаментальных противоречий между экологическим восстановлением, развитым главным образом в наземной области, и восстановлением коралловых рифов. Международные принципы и стандарты для практики экологического восстановления [54] содействуют использованию эталонной экосистемы как модели или цели, применяемой для оценки прогресса в восстановлении местной экосистемы. В то время как восстановление видов, находящихся под угрозой исчезновения (например, *Acropora* sp<sup>39</sup>), не соответствует этому понятию экологического восстановления, а движущей силой является разработка одного важного метода, используемого для восстановления коралловых рифов, и включенного в данный обзор. Смешивание целей проекта и мониторинга для документального подтверждения успешного восстановления видов, находящихся под угрозой исчезновения, по сравнению с восстановлением коралловых рифов является одним из источников путаницы, что усложняет проведение обзора.

Восстановление может быть пассивным или активным, причем, **пассивное восстановление** (называемое также “естественной регенерацией” или “косвенным восстановлением”) “основано на росте количества индивидуальных особей, без непосредственной посадки или посева, только после исключения причинных факторов”, в то время как **активное восстановление** (называемое также “непосредственным восстановлением” и часто сокращаемое просто до “восстановления”) основано на реинтродукции или природе [54].

В широком плане, эти два типа восстановления соответствуют также уровню деградации, поддерживаемому окружающей средой, в которой пассивное восстановление можно применять к участкам с меньшим повреждением, а активное восстановление считается необходимым в тех случаях, когда естественное восстановление без оказания помощи маловероятно. И наконец, **вмешательство** – это действие, “осуществляемое для достижения восстановления, такое как улучшение приживания нижнего слоя, борьба с привнесением экзодических видов, доведение до необходимого состояния среды обитания, реинтродукция видов” [54].

В этом обзоре авторы исключили такие методы пассивного восстановления, как истребление хищников (например, морская звезда “терновый венец”<sup>40</sup> и борьба с *Drupella*<sup>41</sup>), если только они не проводились в сочетании с активным восстановлением (например, удаление микроводорослей с пересадкой).

---

<sup>39</sup> Род мелких полипов каменных кораллов в типе Cnidaria. Описано 149 видов.

<sup>40</sup> Многолучевая морская звезда семейства *Acanthasteridae*, обитающая на коралловых рифах Красного моря и тропической части Индийского и Тихого океана. Питается полипами коралловых рифов. Одна звезда поедает до 13 м<sup>2</sup> кораллов в год.

<sup>41</sup> Род морских улиток, морских брюхоногих моллюсков, которые постоянно атакуют и губят живые кораллы.

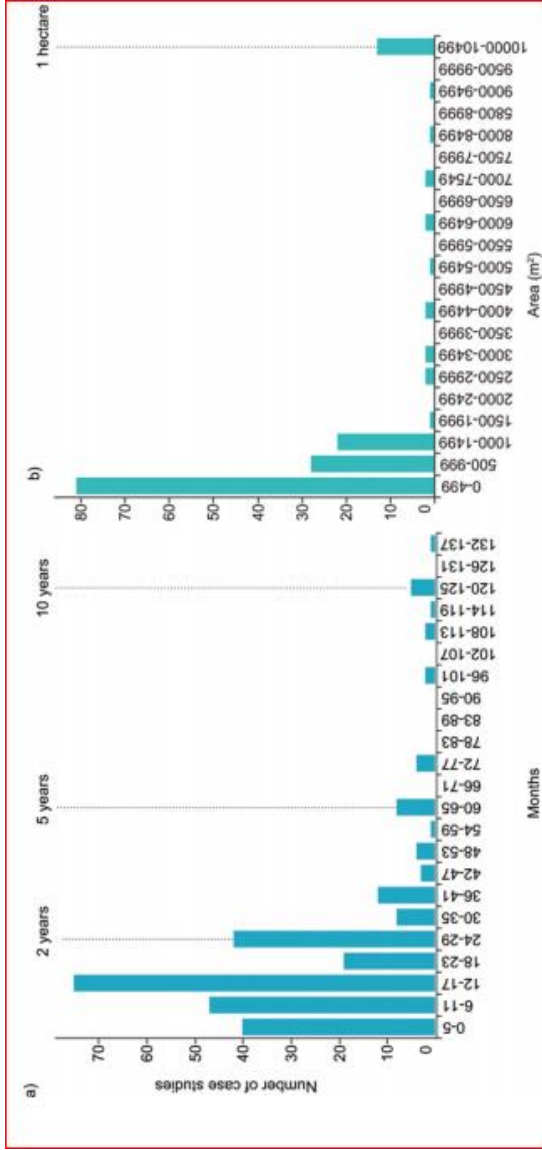


Рисунок 2. а) Временной и б) Пространственный масштаб проектов восстановления коралловых рифов, включенных в обзор.

Следует отметить, что ось x в обеих группах была урезана с целью визуализации.

Пояснения к рисунку 2: Number of case studies – количество конкретных исследований, years – годы, hectare – гектары, Months – месяцы, Area (m<sup>2</sup>) – площадь (м<sup>2</sup>)

Данные доступны из Dryad – международного хранилища данных открытого доступа к данным исследований, особенно данных, лежащих в основе научных и медицинских публикаций (<https://doi.org/10.5061/dryad.p6t3816>).

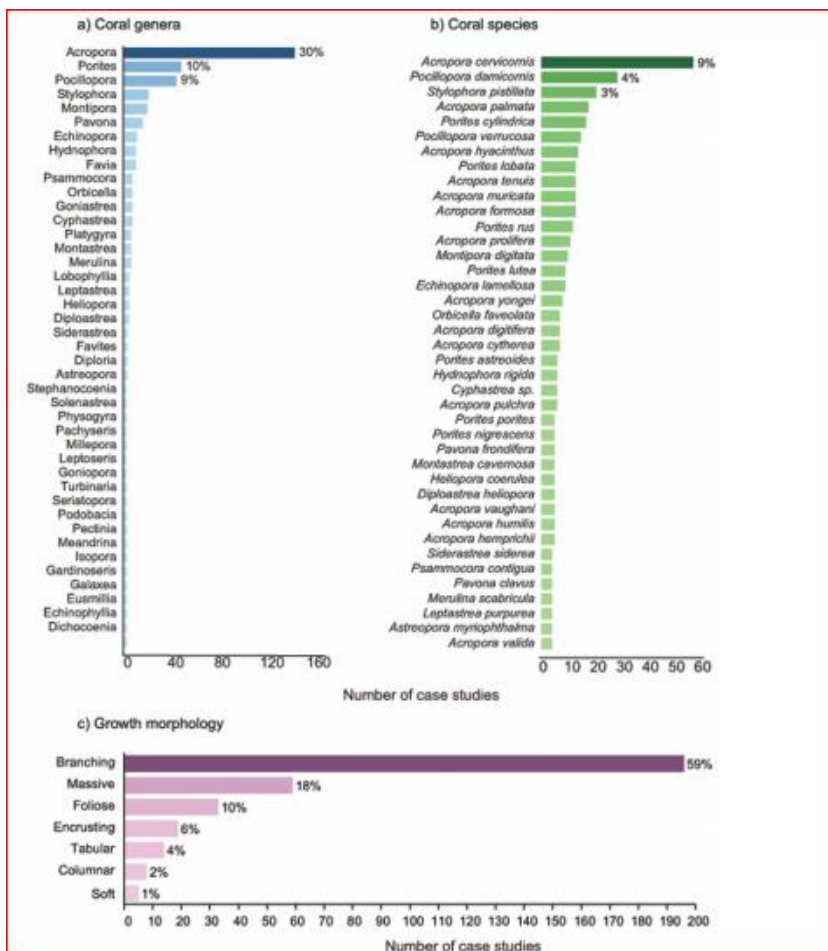


Рисунок 3. а) виды б) род и в) морфология роста коралловых рифов, использованные в проектах восстановления рифов.

Примечание к рисунку 3: ось у для рода и видов существенно сокращена для визуальных целей. Полный перечень видов можно увидеть в [онлайн-базе данных](#). Большая доля респондентов обследования не сообщила о видах или роде (но выбрала “смесь”). Численные данные основаны на общем количестве конкретных исследований, в которых сообщалось о видах или роде

Пояснения к рисунку 3: а) coral genera род кораллов, б) coral species – виды кораллов, Number of case studies – количество конкретных исследований, в) Growth morphology – морфология роста, род кораллов: Acropora - акропора, Porites - пориты, Pocillopora - поциллопоры, Stylophora - стилофора, Montipora- монтипоры, Pavona - павона, Echinophora – эхинофора, Hydnophora - хиднофора, Favia - фавия, Psammocora - псаммопора, Orbicella - орбиселла, Goniastrea – гонастрия, Platygyra -

платигиры, Montastrea - монтастрей, Merulina - мерулина, Lobophylia - лобофилия, Leptoseris - лептосерис, Heliopora - хелиопора, Diploasrea - диплостера, Siderastrea - сидерастрей, Favites - фавитес, Diploria - диплория, Asteopora - астеропория, Stephanosoenia - стефаносоения, Psysogya - физиогия, Pachyseris - пахисерис, Milleropora - миллепоры, Leptoseris - лептосерис, Goniopora - гониопора, Turbinaria – турбинария, Seriatopora - сериатопора, Podobacia – подобация, Pectinia- пектиния, Mendrina - мендриния, Isopora - изопора, Gardinoseris - гардиносерис, Galaxea - галаксей, Eumilia- эумилия, Echinophylia - эхинофилия, Dichosoenia – диохоения, виды кораллов: Acropora cervicornis - оленерогий коралл, Pocillopora damicornis – коралл “цветная капуста”, Sylophora pisillata – коралловый кашпошон, Porites cylindrica – горбатый коралл, Pocillopora verrucosa – кружевной коралл, Acropora hyacinthus – акропора гиацинт, Acropora muricata – акропора муриката, Acropora formosa – акропора формаза, Porites rus- полевой коралл, Acropora prolifera – акропора пролифера, Montipora digitata – коралловый пальчик, Porites lutea – поритес лютея, Echinopora lamellose- эхинопора ламеллоза, Acropora yongei – акропора голубая, Orbicella faveolata – горный звездный коралл, Acropora digitifera – акропора дигитифера, Acropora cytherea – акропора цитерей, Porites astreoides – горчичный коралл, Hydnoophora rigida – роговой коралл, Cyprastrea sp. – ципрастера голубая, Acropora pulchra – акропора пульхра, Porites porites – горбатый коралл, Porites nigrescens – темноватый порит, Ravona frondifera – коралл крекер, Montastrea cavemosa – коралл “великая звезда”, Helipora coerulea – голубой коралл, Diplastia heliopora- флуоресцентный жесткий коралл, Acropora vaughani – акропора Вона, Acropora humilis – акропора хумилис, Acropora hemprichii – акропора Хемприха, Siderastrea siderea – крутлый звездчатый коралл, Psammocora contigua – псаммопора цифровая, Ravona clavus – павона клавус, Merulina scabricula – мерулина извилистая, Leptastrea purpurea – каменистый коралл, Asteopora myriophthalma – астеопора звездчатая, Acropora valida – апропоридный коралл, морфология роста: Branching - ветвление, Massive - массивный, Encrusting - обрастающий, Tabular – пластинообразный, Columnar - столбчатый, Soft – мягкий

Авторы сосредоточились в обзоре на активных методах восстановления, при которых происходит реинтродукция кораллов (например, пересадка коралловых фрагментов, или улучшение приживаемости личинок) либо укрепление сообщества кораллов (например, стабилизация нижнего слоя или удаление водорослей) с целью восстановления экосистемы рифов. В опубликованной литературе используется много терминов, которые описывают то же самое вмешательство. Для прояснения авторы представили термины, использованные ими в обзоре, их определения и альтернативные термины (табл. 1).

### **Восстановление коралловых рифов в изменяющемся мире Где, как и почему происходит восстановление коралловых рифов?**

Авторы обзора идентифицировали 362 конкретных исследования, из которых 221 были из научной литературы, 78 из внеакадемической литературы (т.е. отчетов и он-лайн описаний, а 63 были формой ответов на проведенное обследование специалистов-практиков в области восстановления коралловых рифов. Проекты восстановления проводятся в 56 странах (рис. 1), а большая часть проектов проводится в США (Флорида, Гавайи), на Филиппинах, в Индонезии и Таиланде (вместе на них приходится 40% проектов). В базе данных представлено 10 категорий восстановления коралловых рифов, а большая их часть относится к фрагментации коралловых рифов или пересадке коралловых фрагментов (68%).

В общем, специалисты-практики сообщали о двух основных целях: “научных исследованиях” (44%) и “ускорение восстановления после возмущающих воздействий” (38%, [онлайн-визуализация](#)). Однако цели, установленные для каждого проекта, имели заметные различия между источниками данных; а именно, в 65% рецензированных статей в качестве основной цели отмечали научные исследования, по сравнению с 18 и 8% для внеиздательской литературы и обследований, соответственно. Вместо этого в конкретных исследованиях из внеиздательских источников и обследованиях сообщали главным образом о желании “ускорения восстановления после возмущающих воздействий” (59 и 40%, соответственно). Это отражается в данных недавнего обзора на основе большей части опубликованной литературы, в которой оценивали мотивации, выходящие за пределы восстановления [55]. Было выявлено, что в большей части опубликованных (и рецензированных) результатов исследований по восстановлению коралловых рифов внимание было сосредоточено на усовершенствовании подхода к восстановлению и ответах на экологические проблемы (что, по мнению авторов, соответствует категории “научных исследований”). Подобным образом авторы работы [56] выявили, что 60% исследований по пересадке кораллов было сосредоточено на оценке “биологической реакции на пересадку” (с кодовым названием в данном обзоре – научные исследования), в то время как остальные 40% имели своей целью “ускорение восстановления после возмущающих воздействий”, или “восстановление самоподдерживающейся, функционирующей экосистеме рифов”.

### **Временная и пространственная протяженность проектов восстановления**

В конкретных исследованиях восстановления коралловых рифов отмечено доминирование кратковременных проектов, и в 60% всех проектов сообщали о менее чем 18 месяцев мониторинга. В общем, медианная длительность проектов составляла 12 месяцев, но имелись различия между типами проектов. Обследование респондентов (т.е. практические специалисты в области восстановления коралловых рифов) выявило тенденцию сообщения о более длительных проектах (медианное значение 24 месяца), в то время как во внеиздательской литературе и рецензированных проектах сообщали о медианном мониторинге в течение 12 месяцев ([рис. 2](#)). Несоответствие между источниками данных можно объяснить относительно короткими временными периодами для большинства исследовательских проектов (например, студенческие проекты и однолетние циклы финансирования) и давлением на быструю публикацию результатов. Напротив, в обследовании респондентов могла быть большая вероятность сообщения о всем периоде деятельности по восстановлению с самого начала (т.е. “время на рифе”). Подобным образом, большинство проектов проводилось на небольшой площади, с медианным размером восстановленной площади 100 м<sup>2</sup> ([рис. 2](#)). В опубликованных рецензированных в литературе проектах сообщалось о медианной площади 300 м<sup>2</sup>, в то время как в обследовании респондентов сообщали о большем масштабе восстановления (медианное значение 500 м<sup>2</sup>). Во внеиздательских источниках медианный размер составлял 47 м<sup>2</sup>. Медианные значения использовали для описания пространственных и временных масштабов вследствие правого (положительного) перекаса в обоих наборах данных с длинными хвостами.



Хотя мониторинг чаще всего проводили в течение 12 месяцев, возмущающие воздействия на рифах носили случайный характер. В то время как для большинства коралловых рифов отмечено значительное обесцвечивание, в течение этого периода были разрушительные штормы и вспышки болезней, но вполне возможно, что, по крайней мере, 12 месяцев могут пройти без этих возмущающих факторов. Несоответствие между относительно коротким периодом мониторинга и временным масштабом, в котором происходят возмущающие воздействия, может значительно увеличивать рост или уровень выживания. Например, авторы работы [57] описали успешный проект восстановления в Индонезии, когда коралловое покрытие, разнообразие и изобилие рыбы существенно улучшились на модулях искусственных рифов после трех лет внедрения. Однако почти 100% этих кораллов погибли в результате обесцвечивания примерно через 6 месяцев после появления заключения о результатах исследования. В то время как эти авторы сообщили в своей публикации об этом явлении, другие специалисты-практики могли и не знать о том, что факт этой смертности имел место после прекращения мониторинга проекта, или у них был небольшой стимул публиковать информацию о неудачном эксперименте. Авторы обзора полагают, что короткое время мониторинга является проблемой и может привести к переоценке степени выживания кораллов, так как вероятность значительных стрессовых явлений, вызывающих смертность, должна со временем возрастать. В то время как не было доказательства снижения выживаемости с увеличением длительности исследования, это может отражать относительно низкое количество исследований, длившихся более 12 месяцев с проведением мониторинга. Кроме того, для смертности характерна тенденция иметь максимальные значения на ранних стадиях жизни, и она снижается по мере того, как кораллы становятся более зрелыми и старыми [58].

Максимальный период мониторинга, сообщенный в наборе данных, составил 12 лет в проекте пересадки [59]. Исследования, которые продолжались 10 лет или больше ( $n = 5$ ), описывались в отчетах, основанных на программах мониторинга для искусственных рифов или участков восстановления с пересаженными кораллами; для них характерна тенденция большего пространственного масштаба ( $>1000 \text{ м}^2$ ), чем для кратковременных исследований. Подобным образом, исследования с пространственным масштабом более 1 га ( $10000 \text{ м}^2$ ,  $n = 17$ ) были главным образом проектами с мониторингом искусственных рифов или участков с пересадкой кораллов. К сожалению, несмотря на долговременные проекты с большим пространственным масштабом, только в двух таких проектах сообщалось о выживании кораллов (средний уровень выживания 80%).

### **Кораллы, использованные в проектах восстановления**

В общем, проекты восстановления коралловых рифов сосредоточены главным образом на быстро растущих ветвящихся кораллах (59% исследований). Почти для трех четвертей (72%) сообщенных исследований характерно использование более одного вида кораллов в своих проектах восстановления, в то время как в оставшихся 28% использовались единичные виды. Таким образом, разнообразный ряд видов, представленных в наборах данных, включая в общей сложности 229 различных видов из 72 родов кораллов (рис.3). В трети проектов (30%) использовали род кораллов *Acropora* (см. сноску 39), а в 9% исследований был включен один вид *Acropora cervicornis* (Стагхорн коралл – см. сноску 24) [60 – 62]. Среди всех опублико-

ванных конкретных исследований пятью основными видами, использованными в проектах восстановления были *Acropora cervicornis*, *Pocillopora damicornis* (коралл “цветная капуста”), *Stylophora pistillata* (коралловый кашпошон), *A.palmata* (оленерогий коралл – см. сноску 23) и *Porites cylindrica* (горбатый коралл) (32 % исследований, [рис. 3](#)). Концентрация внимания на кораллах рода *Acropora* (акропора) и *Pocillopora* (поциллопора) имеет сходство для всех источников данных. Значительное внимание на *A. cervicornis* и *A.palmata*, вероятно, является результатом того, что эти важные рифообразующие виды были перечислены как находящиеся под угрозой исчезновения в Законе США о видах, находящихся под угрозой исчезновения (71 FR 26852), и как находящиеся под угрозой исчезновения в Красной книге Международного союза охраны природы (IUCN) видов, находящихся под угрозой исчезновения.

Средний уровень выживания восстановленных кораллов составлял 66% (стандартная погрешность  $\pm$  SEM 2,2%). Когда проекты подразделили по родам кораллов, выявилась тенденция снижения уровня выживания до 60–70% для чаще всего используемых родов (т.е. >10 конкретных исследований с данными по выживанию по родам). В то время как средний уровень выживания для некоторых родов превышал 90%, эти оценки были основаны на не более, чем трех конкретных исследованиях, и это дает основание полагать, что наиболее подходящий род все еще имеет неудовлетворительную поддержку с точки зрения имеющейся информации, и необходимы дополнительные дублирующие исследования (в особенности для родов с хорошими показателями). Авторы отсылают читателя к дополнительной информации ([S3 File](#)) для получения более подробных сведений о выживании родов и видов. Сходство в средних уровнях выживания между родами кораллов предполагает, что выживание кораллов и успехи проектов восстановления меньше связаны с индивидуальными использованными видами или родами, и подчеркивает важнейшую роль экологических условий в достигнутых результатах в проектах восстановления (см. также [63]). Для перевода этих значений в контекст в рамках более широких проектов восстановления в области экологии, оказалось, что средний уровень выживания в 66 % существенно выше, чем сообщенные значения для экологического восстановления сухопутных систем, а успешные результаты пересадки снизились < 50% [64, 65].

Далее, в недавнем обзоре восстановления морской прибрежной среды обитания в Австралии подчеркивается, что восстановление во многих морских экосистемах в отчетах часто указывалось, что выживание в среднем составляло менее половины пересаженных рифов. Например, для 60% проектов восстановления морских трав сообщалось о < 25% выживания всходов [66].

## Методы восстановления

Авторы идентифицировали десять основных методов или способов восстановления коралловых рифов. Авторы изучали базу данных для оценки эффективности каждого метода и способа, связанного с каждым вмешательством. Эти данные визуальным образом представлены в интерактивной базе данных и подробно описаны в [S3 File](#).

## Непосредственная пересадка

Самый ранний и распространенный метод восстановления коралловых рифов связан с непосредственной пересадкой коралловых фрагментов, от донора до рифа-реципиента. Имеется 94 описания непосредственной пере-

садки, которые представляют 20 % всех свидетельств. Этот метод наиболее распространенный в программах, предназначенных для спасения кораллов от планируемой деятельности по строительству, которая в противном случае привела бы к разрушению или нарушению жизни колоний [32, 67 – 76]. В общем, в исследованиях по непосредственной пересадке сообщается о среднем уровне выживания 64%, а в 20% сообщалось о >90% уровня выживания пересаженных кораллов (интерактивная база данных). Непосредственная пересадка включает главным образом быстро растущие кораллы, и более чем в трех четвертях конкретных исследований использовали кораллы с ветвящейся морфологией. В то время как было сделано допущение, что пересаженные кораллы будут привлекать другие виды рифа, было мало свидетельств в поддержку представления об увеличенной колонизации другими видами рифа в непосредственной близости от пересаженных кораллов [77]. Эксперименты, запланированные для проверки эффективности пересадки кораллов, проводятся редко (как и для многих других методов), что затрудняет наши возможности для дальнейшего их использования.

### **Выращивание кораллов**

Непрерывное выращивание коралловых фрагментов может оказывать негативное воздействие на донорские кораллы и популяции. В ответ на это была разработана более устойчивая модель, когда кораллы набирали или небольшие фрагменты выращивались в промежуточных питомниках, перед пересадкой на участки восстановления. Стадия отращивания защищает кораллы от разрушения на самых уязвимых стадиях, с намерением пересадить их на поврежденные рифы, как только они достигнут порогового размера, когда станет выше их выживание после пересадки [78]. Кроме того, как только фрагменты достигнут подходящего размера, их можно дробить на более мелкие куски, и их можно выращивать в питомнике, что позволяет умножить количество фрагментов, доступных для пересадки. В данном обзоре 48% конкретных исследований относились к выращиванию кораллов, а большая часть сведений была сосредоточена на стадии пересадки концепции (стадия пересадки 24%, стадия в питомнике 16%, обе стадии 8%). Кораллы выращивали либо в полевых условиях (по месту) или отращивали на почве (вне участка), в зависимости от местных условий. Специалисты-практики поддерживали использование стадии отращивания для восстановления рифа, акцентируя внимание на улучшении роста и уровней выживаемости фрагментов, по сравнению с непосредственной пересадкой. В то время как для некоторых проектов сообщали о высоком уровне выживания (например, >75%; [79]), это не отражалось в наборе данных, когда исследования выращивания кристаллов выявили в среднем 66% выживания на стадии пересадки, по сравнению с выживанием 64% в исследованиях непосредственной пересадки, в которых отсутствовала стадия промежуточного отращивания.

### **Микрофрагментация**

Менее 5% исследований по пересадке проводили с кораллами, характеризующимися медленным ростом. Массивные кораллы главным образом игнорировали, в основном вследствие их медленного роста и более толсто-

го остова, что менее пригодно для фрагментации [80]. Однако исследователи из лаборатории Mote Marine<sup>42</sup> разработали способ микрофрагментации, который позволяет получать массивные и ветвящиеся кораллы и пересаживать с использованием концепции, разработанной для выращивания кристаллов [80, 81]. Алмазная пила используется для разрезания небольших фрагментов (1 см<sup>2</sup>) массивных кораллов, которые затем устанавливаются на известняковые плитки. Спустя примерно 12 месяцев фрагменты можно либо дальше разделять для получения новых микрофрагментов, либо пересаживать. Микрофрагменты, которые прикрепляются к нижнему слою рифа или мертвому остову коралла в массиве, будут легко сливаться вместе, образуя новую колонию (так называемая замена внешней поверхности или покрытия). Результаты исследования продемонстрировали высокий уровень выживания и быстрый рост фрагментов [80, 81].

### **Генетическое разнообразие при бесполом размножении**

Если цели восстановления включают устойчивость к существующим или будущим стрессам, важное значение имеют соображения генетического разнообразия [82]. Акропориты (кораллы в виде рогов оленя), которые предпочтительно используются в методах бесполого размножения, в естественных условиях характеризуются бесполом воспроизводством с помощью фрагментации, в связи с чем рекомендуемый коэффициент генетического разнообразия должен отражать долю уникальных генотипов (совокупность генов данного организма) на количестве колоний, отобранных в определенном состоянии или массиве [83]. Процессы вегетативного размножения, предпочтительно используемые при выращивании, по своей природе ограничивают размножение различных генотипов, и, следовательно, устойчивость. Искусственное оплодотворение [84] или создание посадочного материала из личинок коралловых полипов [85] может оказаться ценным вариантом для поддержания генетического разнообразия при выращивании кораллов. В плане восстановления Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (NOAA) предложен целевой коэффициент генетического разнообразия 0,5 как для *A. cervicornis* (см. сноску 23), так и для *A. palmata* (см. сноску 24) [83].

### **Увеличение темпов роста личинок**

Методы увеличения темпов роста личинок предназначены для улучшения оплодотворения коралловых полипов, выживания личинок и пополнения. Оплодотворение может быть ограничено на рифах с низким коралловым покрытием или асинхронным размножением. Планктонное развитие эмбрионов и личинок может привести к высокой доле личинок кораллов, сносимых с рифов, и, поэтому, не способных осесть или пополнить риф [16, 17, 87]. Использование способности кораллов производить миллионы мальков личинок за счет снижения смертности в раннем периоде жизни может быть наиболее вероятным способом для увеличения масштабов вос-

---

<sup>42</sup> Морская лаборатория, которая является независимой некоммерческой организацией морских исследований, основанной в 1955 г. на острове Сиги в Сарасоте, шт. Флорида.

становления, помимо существующих решений малого масштаба. В шести исследованиях (1,3%) описан относительно новый метод увеличения темпов роста личинок, разделенный на два непосредственно на рифе.

В первом типе используют собранные гаметы<sup>43</sup> с эмбрионами, выращенными извне, которые впоследствии осаждаются на ряде искусственных структур, созданных для увеличения уровней выживания после осаждения [88, 89]. Например, бетонные тетраподы (структуры с 4 конусообразными лучами) вначале были “засеяны” личинками *Favia fragum*<sup>44</sup> из Карибского бассейна, которые выращивались извне [90], с большим количеством мальков на единицу поверхности. “Засеянные единицы” разбрасывались на поврежденные площади рифа, после 4-х недель роста мальков коралловых полипов. Примерно 10% осажденных личинок выживали, а 56% осажденных единиц включали, по крайней мере, одну особь *Favia fragum* через год после засева. Авторы пришли к выводу, что основным преимуществом этого метода, является скорость пересадки по сравнению с другими методами, в которых кораллы прикреплялось индивидуально. Второй способ увеличения темпа роста личинок также связан с использованием коралловых гамет, собранных в течение размножения, но эмбрионы и личинки затем выращивались в сборном резервуаре или на рифе, после чего личинки попадали непосредственно на риф в огороженном месте, где они оставались над целевым нижним слоем в течение периода осаждения [58, 91, 92]. Недавно успешно были проведены повторные испытания по увеличению темпов роста личинок на сильно поврежденных поверхностях рифов на острове Северный Лусон, Филиппины [58, 93]. Эта работа продемонстрировала, что массовое расселение на поврежденных площадях рифов (4 × 6 м) может значительно повысить пополнение и восполнение производителей *A. tenuis*<sup>45</sup> спустя три года.

## Искусственные рифы

Примерно пятая часть проектов, обзор которых сделали авторы (21%), были связаны с созданием или добавкой нижнего слоя, так называемых искусственных рифов. Создание нижнего слоя включает в себя структуры, намеренно размещаемые на грунте морского дна, иногда для имитации характеристик естественного рифа или с целью увеличения площади среды обитания фауны рифа, улучшения условий для рыболовства, любительского дайвинга, для предотвращения тралового лова рыбы. Во многих случаях искусственные рифы развертывают в сочетании с другими методами, такими как пересадка коралловых рифов. В прошлом десятилетии компания Mars Incorporated<sup>46</sup> разработала модульный подход к восстановлению ко-

---

<sup>43</sup> Гаметы, или половые клетки, имеющие одинарный набор хромосом и участвующие, в частности в половом размножении

<sup>44</sup> Вид колоннального каменистого коралла, широко известный как коралловый мяч для гольфа.

<sup>45</sup> Вид коралловых акропоридов, обитающих в Красном море, в Индийском и Тихом океане.

<sup>46</sup> Американская компания, основанная в 1911 г., со штаб-квартирой в г. Маклейн, шт. Виргиния, производитель продуктов длительного хранения, включая шоколадные батончики, а также корма для домашних животных, жевательную резинку, напитки, консервированные соусы.

ралловых рифов, который частично пригоден для развертывания на неустойчивом нижнем основании. В способе используются небольшие, модульные, открытые структуры (называемые “пауками”), изготовленные из сортовой стали, собранной в виде гексагональной структуры, похожей на паука, которая затем покрывается защитным покрытием с грубой текстурой (состоящей из смолы и крупнозернистого песка), к которой крепится коралл. Способ основан на сходном методе искусственного рифа с каркасом, он годится для условий Индийского океана и был использован в Индонезии для восстановления рифов, находившихся под воздействием динамита и лова рыбы с помощью цианистого калия [96]. Следует отметить, что значительная часть искусственных рифов, созданных для интенсификации рыбного промысла (т.е. рыбосборных устройств), не была включена в обзор, так они не имели прямой связи с кораллами (см. [S3 File](#)). Однако сообщалось, что для проектов искусственных рифов с пересадкой кораллов, которые сопровождались мониторингом, средняя степень выживания составила 66%.

### Стабилизация нижнего слоя

Для непосредственного физического восстановления поврежденного нижнего слоя в большинстве случаев требуется стабилизирующий балласт в той части, которая была подвержена воздействию штормов или посадке судов на мель. Обоснованием стабилизации является то, что уровни выживания для молодых кораллов относительно низкие на неплотно сидящем нижнем слое [97]. В то время как стабилизация нижнего слоя относительно часто применяется в территориальных водах США, финансируемая за счет страхового возмещения после аварии на судах, имеется мало публикаций в литературе, в которой четко описаны методы и способы (4% конкретных исследований в обзоре). Самым распространенным методом является установка сети или сетчатого материала над балластом для предотвращения дальнейших перемещений. Это обычно предшествует пересадке кораллов на поврежденную часть [97] и/или дополнительному развертыванию искусственных структур. Проекты по стабилизации нижнего слоя, для которых было описано выживание кораллов ( $n = 5$ ), имели уровень выживания 80%.

### Улучшение приживания нижнего слоя с помощью электрического поля

Целью способа является имитация физических и путем химических свойств известняка рифа путем содействия осаждению кальция и магния на искусственном нижнем слое [98]. Между электродами подводится электрический ток, и карбонат кальция и гидроксид магния осаждаются на катоде, в то время как кислород и хлор образуются на аноде [99]. Целью этого образования минералами является потенциальный рост известкования коралловых полипов, благодаря чему форсируется рост колонии и возрастает устойчивость к стрессам. Способ оказался небесспорным, а эксперименты, проводившиеся в попытке подтвердить его эффективность, отличались различными результатами. Авторы работы [100] описали увеличение роста и прикрепление к фрагментам *P. Cylindrica* (горбатый коралл) в случае соединения с установкой, описанной в работе [101]. В ряде других исследований описан рост выживания фрагментов на обрастающих минералами рамах [102- 106]. Однако во многих экспериментах не удалось описать сходных положительных эффектов воздействия электрического поля на коралловые

фрагменты. Например, в работе [107] выявлено, что фрагменты кораллов *A. pulchra* (акропора пурпурная) и *A. youngi* (акропора голубая), которые подвергались воздействию сходного электрического тока, как было описано предыдущими исследователями, растут медленнее, чем у контрольных колоний. Подобным образом в работе [108] описан негативный эффект на рост одного вида кораллов (*A. youngi*), но положительный эффект на рост другого вида (*A. pulchra*) на катоде, что дает основание полагать, что результаты могут отличаться даже между видами кораллов одного вида. Расхождения между исследованиями не позволяют сделать четкие выводы о методе обрастания минералами.

## Выводы и рекомендации

В этом обзоре подведены итоги четырех десятилетних проектов по восстановлению коралловых рифов и исследований, и насколько известно авторам, это наиболее всесторонний обзор имеющихся до сих пор способов восстановления коралловых рифов. Сопутствующая интерактивная база данных предоставляет научно-обоснованный источник сведений для исследователей, менеджеров и специалистов-практиков, которые могут опираться на нее и использовать. Авторы документально подтвердили успехи и неудачи в восстановлении коралловых рифов за последние десятилетия, о которых сообщали ученые, менеджеры и специалисты-практики. Восстановление коралловых рифов разделяет некоторые общие “трудности роста”, более широко связанные с экологическим восстановлением. Например, в работе [109] проливается свет на пять препятствий для масштабирования экологического восстановления пресноводных озер и рек в Австралии, и имеется почти полное совпадение с проблемами, возникающими в результате рассмотрения проектов восстановления коралловых рифов в ходе этого исследования. (1) Нежелание ответственных за управление ресурсами проводить крупные и долговременные проекты восстановления, что следует из данных авторов о небольших размерах и кратких временных рамках большинства проектов. (2) Неудовлетворительное планирование многих проектов восстановления (например, у многих проектов отсутствуют контроль проведения экспериментов и адекватное дублирование, и у них плохо выбранные эталонные системы и т.д.) (3) Недостаток адекватного и непрерывного мониторинга проектов в сочетании с (4) отсутствием отчетности о достигнутом прогрессе и результатах проекта. И наконец, (5) у многих проектов были проблемы, связанные с ростом пространственного и временного масштаба.

Наука и практика экологического восстановления (включая восстановление коралловых рифов) могут многое получить от наук экологии, и имеются определенные свидетельства того, что это происходит. Впрочем, в нашем быстро изменяющемся мире экологи извлекают уроки из проектов восстановления. Подобным образом, более широкая информированность об уроках, почерпнутых у специалистов-практиков по восстановлению в сухопутных и пресноводных системах, а также в морских средах обитания будет способствовать ускорению передачи знаний. Это позволит ускорить переход в восстановлении коралловых рифов от малых до экологических масштабов, переход который исключительно важен для успешного применения восстановления коралловых рифов с целью устойчивости всех рифов. Однако авторы концентрируют внимание на том, что важно не рассматривать восстановление как замену значимых действий в области изменения

климата. В то время как имеются некоторые основания полагать, что местные управленческие действия могут помочь повысить устойчивость коралловых рифов в отношении масштаба позволят справиться с масштабным кризисом изменения климата [31, 111].

Для большинства методов, описанных в этом обзоре, документально подтвержден рост кораллов, при относительно высоких уровнях выживания. Авторы отсылают читателя к каждому конкретному разделу с описанием потенциального применения и ограничений, связанных с каждым методом. Авторы также выделяют две проблемы, которые в случае их решения дадут возможности повысить шансы на успех будущих проектов. Они включают: (1) отсутствие четких и достижимых целей; (2) отсутствие надлежащего и стандартизованного мониторинга и отчетности; (3) неудовлетворительно спланированные проекты в отношении заявленных целей.

### Цели и мониторинг

Цели для восстановления коралловых рифов обычно имеют широких экологический охват, который совпадает с принципами устойчивости рифов [51]. Например, установленные цели восстановления коралловых рифов обычно концентрируются на ускорении восстановления [59, 112, 113], восстановлении функционирующей системы рифа или смягчении последствий снижения популяции и управлении видами, находящимися под угрозой исчезновения [115]. Однако в некоторых проектах имеется четкое несоответствие между заявленными целями и тем, что реально определяется в течение мониторинга результатов. Например, из проектов с экологической целью в данном обзоре ( $n = 129$ ) в 49% не оценивались какие-либо важные показатели для оценки успеха проекта, связанного с этой целью, и это также несет риск снижения общественной и академической поддержки восстановления коралловых рифов, вообще, когда возникают беспочвенные ожидания, а затем отсутствует возможность предоставить доказательства успеха или провала.

Проекты восстановления коралловых рифов, ориентированные на регенерацию рифов, должны привести к восстановлению размножения популяции в качестве основополагающей цели [54, 58, 116]. Для этой популяции не должно быть необходимости в непрерывном вмешательстве, и должны происходить процессы естественного роста личинок и пополнения. Четкая цель создания самоподдерживающейся размножающейся популяции является ключевым упущенным компонентом почти во всех проектах восстановления коралловых рифов, и доказательства, подтверждающие, что цель достигнута, редко контролируются. Это предполагает, что в медианном периоде мониторинга 12 месяцев, который намного меньше, чем период времени, требующийся для того, чтобы кораллы достигли зрелого репродуктивного возраста. В этом обзоре, например, авторы выявили, что результаты проектов восстановления коралловых рифов в значительной мере подвергались мониторингу с использованием биологических показателей кораллов (например, рост и выживание). На рост и выживание кораллов ссылались как на результаты примерно в 60% опубликованных литературных источниках, и они входили в большую часть показателей результатов в ответах на вопросы обследования. Это отражалось в том, что было обнаружено в прежних обзорах [51, 55]. Другие популярные биологические показатели, используемые как результаты, включали условия и самокрепление фрагментов. В то время как эти показатели являются важными



для оценки способности кораллов восстанавливаться, а для точных методов требуется экологический мониторинг, направленный на оценку экологических результатов усилий по восстановлению и определение того, достигнуты ли начальные цели и требования. Надлежащие показатели позволяют также сделать лучшие оценки экологических и демографических процессов, которые происходят на восстановленных участках [117, 118], и, таким образом, информировать о гибком управлении усилиями по восстановлению в долговременной перспективе.

По необходимости авторы использовали выживание кораллов в целях сравнения различных исследований в этом обзоре. В то время как полезно бывает оценить эффективность краткосрочных показателей каждого метода, становится все более очевидно, что это не всегда бывает важным показателем для оценки долговременного успеха проектов восстановления. Во-первых, опубликованные данные по выживанию потенциально склонны к отчетности о повышенном выживании. Имеется ограниченный стимул для публикации или сообщения о неудачных проектах восстановления для исследователей, специалистов-практиков и управленцев, и это может оказаться под влиянием озабоченности тем, что будут обескуражены спонсоры и общественность. Во-вторых, при более коротком времени мониторинга искусственно могут быть завышены данные по выживанию, что не будет отражать долговременную судьбу восстановленных кораллов. И наконец, растущее количество проектов с использованием полового размножения как источника вегетативного размножения кораллов, которые естественно имеют меньшую выживаемость [58], так что использование этого показателя станет почти бессмысленным. Это еще больше подчеркивает необходимость в более целостном наборе инструментов экологического мониторинга с охватом всего спектра кораллов, совпадающих с целями проекта вместо того, чтобы полагаться только на простые биологические показатели кораллов.

Социально-культурные и экономические результаты также должны быть оценены как часть целей восстановления коралловых рифов, такие как, будет ли восстановление коралловых рифов содействовать появлению альтернативных средств существования [32, 119] или содействовать местному бережному и ответственному отношению к природе [120, 121]. Как и в других формах управления, адекватное привлечение заинтересованных сторон к планированию и реализации усилий по восстановлению, вероятно, окажет значительное влияние на результаты проекта [39, 96, 113, 122, 123]. И наконец, специалисты-практики должны привлекать местные сообщества как можно в большей степени на протяжении планирования и выполнения проекта восстановления для обеспечения принципа "местной собственности", т.е. идентификации и управления проектом восстановления, с целью гарантии того, чтобы усилия по восстановлению совпадали с местными целями и чтобы восстановленный коралловый риф процветал после прекращения вмешательства человека.

В то время как необходимо расширить, *что* очевидно следует подвергать мониторингу, имеется также необходимость в стандартизации того, *какие* результаты проектов восстановления следует контролировать. Отсутствие стандартизации в том, как регистрировать смертность, выживание и рост, приводит к тому, что эти показатели трудно сравнивать между исследованиями. Даже для основной единицы данного организма отсутствует стандартизация. Проекты выращивания кораллов часто относят к "фрагментам" без количественного определения размера (средний, минимальный или максимальный) этих единиц [32]. Такое же отсутствие точности применимо к

термину “колония кораллов”. Такое отсутствие специфичности в определении фрагментов или колоний с точки зрения их размера затрудняет нашу способность количественно определить и сравнивать выживаемость. Выживаемость небольшого (например, 10 см<sup>2</sup>) фрагмента и колонии, как ожидается, будет намного меньше, чем у единицы с размером 40 см<sup>2</sup> (например, [124, 125], но см. [61], хотя однако в большинстве сообщений нет четких разъяснений о проценте выживаемости пересеченных кораллов в соответствии с размером. Показателем, который лучше всего иллюстрирует отсутствие стандартизации в отчетности, является рост кораллов, когда было использовано многообразие нестандартных показателей – включая линейное расширение (суммарная длина каждой отдельной ветви в колонии [62, 115, 126, 127], высоту [128], “экологический объем”<sup>47</sup> [129, 130], ширину ветви [60,131], количество ветвей [132 – 134], базальтовая ширина (ширина нижнего основания) [135], а также сочетание ширины, длины, высоты и парциальная смертность, максимальный диаметр колонии, количество ветвей и виртуально любой другой аспект, который можно представить. Используемые показатели имели такое малое перекрытие, что сравнение общего роста между исследованиями было затруднено или невозможно. Подобным образом, часто упоминаются смертность или выживаемость, но без четкого разъяснения того, что собственно определяется. В большинстве исследований использовали простую бинарную систему оценок (т.е. “живой”, “мертвый”), в то время как в других исследованиях количественно определяют парциальную смертность отдельных фрагментов кораллов (например, > 0% остающейся живой ткани = живая [61, 62, 97, 136, 137]). Должны использоваться установленные методологические подходы к демографии<sup>48</sup> кораллов [138], которые не только позволяют помочь стандартизовать показатели, но также и способствовать подходам моделирования для оценки целесообразности широкого диапазона возможных подходов восстановления, которые существуют. Затем можно будет использовать надлежащие показатели для оказания помощи в разработке управленческих решений с помощью расчета окупаемости усилий для дальнейшей оптимизации практики [63].

В то время как отсутствие стандартизации является проблемой, это понятные последствия того, что многочисленные группы и специалисты-практики действуют изолированно, мало общаются и имеют очень разные цели. Эта проблема в настоящее время признается, и группы типа Сеть устойчивости рифов при организации Охраны природы (см. сноску 38) и Консорциум по восстановлению коралловых рифов разрабатывают и делятся современными руководящими практическими рекомендациями для восстановления коралловых рифов со всем миром. Авторы обзора призывают исследователей публиковать сведения о неудачных экспериментах и проектах, что необходимо для быстро разрастающейся области восстановле-

---

<sup>47</sup> Экологический объем лучше всего выражает общую архитектуру развивающихся колоний, чтобы знать пространство, которое колонии занимали в структуре, и увеличение размера, по сравнению с исходным размером.

<sup>48</sup> К демографическим показателям относятся такие показатели как обилие (общее число организмов), рождаемость (скорость прироста численности), смертность (скорость сокращения численности в результате гибели особей), возрастной состав (отношение численности разновозрастных особей).

ния кораллов (в журнале *Restoration Ecology*<sup>49</sup> в настоящее время имеется одна ссылка на восстановление кораллов под рубрикой “Неудачи и сюрпризы”; [139]). Авторы обзора предлагают специалистам-практикам пользоваться следующими рекомендациями для отчетности о результатах проектов восстановления: (1) четко описывать, как были рассчитаны показатели, и на чем были основаны расчеты; (2) избегать введения новых терминов для простых демографических параметров, если только новый показатель не приведет к существенному усовершенствованию имеющихся методов. Ссылаться на опубликованную литературу и использовать методы, установленные в более широкой области экологии кораллов, а не предлагать новые показатели, которые связаны с обособленными данными в относительно небольшом разделе литературы о восстановлении коралловых рифов; (3) избегать сложных формул (т.е. отступающих от необработанных данных) и пользоваться простыми расчетами (т.е. один или несколько шагов от необработанных данных); (4) сообщать о своих наблюдениях и открытиях международному сообществу международных ученых и специалистов-практиков для обеспечения того, чтобы информация не терялась.

Идеальная программа мониторинга должна быть всесторонней и целостной, включая экологические, экономические и социальные показатели. Однако все проекты ограничены с точки зрения данных и логистических возможностей, и по большей части вряд ли они могут осуществлять мониторинг полного набора показателей. В конечном итоге, специалисты-практики должны принять программу мониторинга, которая будет иметь четкие связи с установленными целями проекта. Часто может быть целесообразно проводить мониторинг проекта в несколько стадий; например, кратковременный мониторинг биологических показателей для оценки эффективности метода в сочетании с долговременным мониторингом экологических результатов. Кроме того, использование заменителей и индикаторных показателей может помочь снизить затраты и сократить требующееся время. Например, коралловое покрытие и сложность могут получить подходящий показатель для значения восстановленной среды обитания для других видов рифов. Помимо этого, количество или доля размножающихся кораллов может быть более полезной оценкой успеха восстановления, чем выживание и рост пересаженных кораллов. Заменители и индикаторы необходимо тщательно проверять и оценивать перед их широким использованием. И наконец, местные допускаемые ограничения и условия в конечном итоге могут помочь в разработке программ мониторинга в большей мере, чем идеализированные рекомендации с чисто научной перспективой. Например, проекты восстановления в Национальном морском заповеднике Флорида-Кис (единственного барьерного кораллового рифа в Северной Америке и третьего по величине в мире) должны проводиться с обширным “отслеживанием судьбы” отдельных пересаженных фрагментов с течением времени, так что имеются ограниченные возможности для проведения более углубленного экологического мониторинга. Помимо этого, низкое разнообразие и богатство существующих живых кораллов на флоридских и карибских рифов по сравнению с рифами в Индийском и Тихом океанах и значительная концентрация внимания на

---

<sup>49</sup> Журнал “Реставрационная экология”, издаваемый Обществом экологической реставрации, созданным в США в 1995 г.

восстановлении двух видов, находящихся под угрозой исчезновения (*A. palmata*, *A. Cervicornis*) (см. сноски 23 и 24) приводят к тому, что некоторые показатели становятся менее пригодными. Необходима ясность в различии между показателями, которые относятся к видам, находящимся под угрозой исчезновения, и отнесение этих видов в общее восстановление рифов. Специалисты-практики должны стремиться по возможности придерживаться местных руководств по добросовестной практике.

Во многих проектах установлены экологические цели, хотя в реальности они являются главным образом являются социальными (например, наращивание местного потенциала, управление) или экономическими (например, создание рабочих мест, “образовательный туризм”) целями. Социально-экономические цели могут быть подходящими и важными, и авторы выступают против утверждения, что экологические цели являются единственными важными целями восстановления. Однако среди общественности и в научном сообществе есть недоверие к тому, что восстановление коралловых рифов может происходить из-за несоответствия между тем, что публично излагается как цели и задачи проекта, и выполненной реальностью. Авторы призывают специалистов-практиков ставить четкие и реальные цели, которые будут конкретными, измеримыми, достижимыми, реалистичными и привязанными к срокам (SMART) [140], и разрабатывать проекты и программы мониторинга, которые хорошо стыкуются с этими целями, избегая искусственно завышенных ожиданий.

### **Будущие соображения**

Будущие работы по восстановлению коралловых рифов, вероятно, будут различаться своими масштабами: (1) проекты управления участками малого масштаба; (2) крупномасштабные проекты с вмешательством в весь риф. Первые включают в себя местные проекты с социально-экономическими целями, такими, инициаторами и ведущей силой которых являются туристическая отрасль и исследователи-любители. В то время как масштаб можно достичь с помощью широкого участия ключевых заинтересованных сторон, эти проекты, вероятно, будут связаны с использованием технологий для повышения кораллового покрытия в выбранных участках с высокой ценностью. Вторая категория важна в экосистемном масштабе и требует существенного пространственного масштабирования проектов, если восстановление должно помочь справиться с будущими проблемами коралловых рифов. Восстановление кораллов – быстр меняющаяся область, и для крупномасштабных проектов может возникнуть необходимость в технологиях, радикально отличающихся от способов, описанных в этом обзоре. В то время как многие прошлые проекты были относительно небольшими, изолированными и разрозненными, вмешательство в масштабе рифа должно быть мультидисциплинарным и, вероятно, потребуется некоторая степень автоматизации и высокий уровень координации и связанности для соответствия с масштабом проблемы. Из способов, описанных в этом обзоре, для нескольких выявлен потенциал выходить за пределы гектара восстановленных коралловых рифов. Самыми масштабируемыми методами (т.е. более 1 га в одном проекте), по-видимому, относятся к способам, в которых используются пропагулы (части коралла, естественным образом отделяющиеся от них и служащие для размножения или расселения), полученные половым путем, как источник восстановления популяций и сообществ кораллов.

## Экологические соображения

В течение подготовки этого отчета стало очевидно, что в то время, как проекты восстановления коралловых рифов имеют своей целью решение проблемы потери среды обитания на коралловых рифах, некоторые способы могут непреднамеренно способствовать возникновению самой проблемы, которую они пытаются решить. Например, большинство искусственных рифов и структур состоят из бетона, а в 10% исследований, в которых кораллы крепились к нижнему слою, использовали цемент и бетон. На производство цемента приходится 5-7% мировых выбросов углерода, главным образом вследствие выбросов  $\text{CO}_2$  в течение процесса кальцинации известняка, от сжигания топлива в цементной печи, а также от выработки электроэнергии [141]. Пропорциональный вклад восстановления коралловых рифов в общий углеродный след бетона, конечно, пренебрежимо мал; однако есть немалая ирония в использовании технологии восстановления, которая непосредственно способствует изменению климата. Далее, в значительном количестве проектов (~ 60%) используется пластик для крепления коралловых фрагментов к нижнему опорному слою, главным образом в форме эпоксидной шпательки или кабельной стяжки. Имеются морские версии обоих этих материалов, хотя они также, вероятно, разрушаются в мелководной, жаркой среде коралловых рифов с высоким уровнем ультрафиолетового излучения. Другие полуфабрикаты, такие как сталь, также обычно используются при восстановлении коралловых рифов [76, 78]. Все эти материалы могут скапливаться на рифах, с потенциально непредсказуемыми долгосрочными последствиями. Однако в то время как было продемонстрировано, что растущая проблема микропластика в морской среде вредна для кораллов [142, 143], она меркнет по сравнению с угрозой изменения климата. Так как область восстановления коралловых рифов растет и расширяется до большого количества кораллов во всем мире, авторы обзора настоятельно рекомендуют специалистам-практикам использовать биоразлагаемые альтернативы, источники местных материалов, местное население и не усугублять проблему коралловых рифов в эпоху Антропоцена.

В этом обзоре представлено самое всеобъемлющее резюме методов активного восстановления коралловых рифов, используемых до настоящего времени, и в сочетании с онлайн-базой данных это важный источник информации для ученых, специалистов-практиков и менеджеров. Авторы описали проекты восстановления коралловых рифов с различными тематическими разделами, с поразительным разнообразием видов кораллов и использованных морфологий. В то время как в небольшом количестве проектов сообщали об экологическом успехе, имеются веские доказательства наших возможностей по выращиванию кораллов в небольшом масштабе. В общем, в отношении основных способов сообщается о сходных средних значениях выживания и роста кораллов, так что решения о том, какие технологии следует использовать, должны основываться на местных условиях, затратах, доступности материалов и пригодности для заявленных целей. Непрерывно совершенствуются технологии, и возрастающее внимание уделяется как пространственному, так и временному масштабированию. Проекты и методы восстановления коралловых рифов могут стать компонентом управления на основе устойчивости [66, 144], вместе с качеством воды и управлением рыболовством. Однако самой значительной движущей силой сокращения коралловых рифов является изменение климата. В то время как многие проекты обращены к этому путем размножения предпо-

ложительно теплоустойких кораллов (т.е. тех, которые недавно пережили эффект обесцвечивания), восстановление коралловых рифов в конечном итоге не может заменить целенаправленного управления ресурсами и действий по борьбе с изменением климата.

### Дополнительная информация

S1 File. Обследование специалистов-практиков о восстановлении рифов

S2 File. Данные, собранные по каждому конкретному исследованию

S3 File. Подробная информация о методах восстановления кораллов, способах и успехах

S4 File. Перечень PRISMA 2009

S1. Рис. Структурная схема PRISMA 2009

### Библиография

1. Gardner TA, Cote IM, Gill JA, Grant A, Watkinson AR. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*. 2003; 301: 958–960. <https://doi.org/10.1126/science.1086050> PMID: 12869698

2. Bruno JF, Selig ER. Regional Decline of Coral Cover in the Indo-Pacific: Timing, Extent, and Subregional Comparisons. *PLoS ONE*. 2007; 2: e711. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000711> PMID:17684557

3. Wilkinson CR. Status of coral reefs of the world: 2008. Townsville, Australia: Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre; 2008.

4. De'ath G, Fabricius KE, Sweatman H, Puotinen M. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012; 109: 17995–17999.

5. Jackson J, MK D, KL C, VV L, editors. Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970–2012. IUCN, Gland, Switzerland; 2014.

6. Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshwater Res*. 1999; 50: 839–866.

7. Pandolfi JM, Bradbury RH, Sala E, Hughes TP, Bjorndal KA, Cooke RG, et al. Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science*. American Association for the Advancement of Science; 2003; 301: 955–958. <https://doi.org/10.1126/science.1085706> PMID: 12920296

8. Bellwood DR, Hughes TP, Folke C, Nystrom M. Confronting the coral reef crisis. *Nature*. nature.com; 2004; 429: 827–833. <https://doi.org/10.1038/nature02691> PMID: 15215854

9. Hughes TP, Kerry JT, A ´lvarez-Noriega M, A ´lvarez-Romero JG, Anderson KD, Baird AH, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*. 2017; 543: 373–377. <https://doi.org/10.1038/nature21707> PMID: 28300113

10. Hughes TP, Anderson KD, Connolly SR, Heron SF, Kerry JT, Lough JM, et al. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*. American Association for the Advancement of Science; 2018; 359: 80–83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048> PMID:29302011

11. Connell JH. Disturbance and recovery of coral assemblages. *Coral Reefs*. Springer-Verlag; 16: S101–S113. <https://doi.org/10.1007/s003380050246>

12. Gouezo M, Golbuu Y, Fabricius K, Olsudong D, Mereb G, Nestor V, et al. Drivers of recovery and reassembly of coral reef communities. *Proceedings of*

the Royal Society B: Biological Sciences. The Royal Society; 2019; 286: 20182908. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2908> PMID: 30963834

13. Cheal AJ, MacNeil MA, Emslie MJ, Sweatman H. The threat to coral reefs from more intense cyclones under climate change. *Glob Chang Biol.* 2017; 23: 1511–1524. <https://doi.org/10.1111/gcb.13593> PMID: 28139035

14. Hughes TP, Kerry JT, Baird AH, Connolly SR, Dietzel A, Eakin CM, et al. Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature.* Nature Publishing Group; 2018; 556: 492–496. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2> PMID: 29670282

15. Monte Falcone M, Morri C, Bianchi CN. Long-term change in bioconstruction potential of Maldivian coral reefs following extreme climate anomalies. *Global Change Biol.* John Wiley & Sons, Ltd (10.1111); 2018; 24: 5629–5641. <https://doi.org/10.1111/gcb.14439> PMID: 30194747

16. Harrison PL, Wallace CC, Dubinsky Z. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. *Ecosystems of the world coral reefs. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals.* Elsevier, Amsterdam; 1990.

17. Richmond RH. Coral-reefs—present problems and future concerns resulting from anthropogenic disturbance. *Am Zool.* 1993; 33: 524–536.

18. Hock K, Wolff NH, Ortiz JC, Condie SA, Anthony KRN, Blackwell PG, et al. Connectivity and systemic resilience of the Great Barrier Reef. *PLOS Biol.* 2017; 15: e2003355. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003355> PMID: 29182630

19. Baker AC, Glynn PW, Riegl B. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuar Coast Shelf S.* 2008; 80: 435–471. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.003>

20. Fabricius KE, Noonan SHC, Abrego D, Harrington L, De'ath G. Low recruitment due to altered settlement substrata as primary constraint for coral communities under ocean acidification. *Proc R SocLond Ser B-Biol Sci.* The Royal Society; 2017; 284: 20171536. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1536> PMID: 28904144

21. Graham NAJ, Jennings S, MacNeil MA, Mouillot D, Wilson SK. Predicting climate-driven regime shifts versus rebound potential in coral reefs. *Nature.* Nature Publishing Group; 2015; 518: 94–97. <https://doi.org/10.1038/nature14140> PMID: 25607371

22. Hughes TP, Kerry JT, Baird AH, Connolly SR, Chase TJ, Dietzel A, et al. Global warming impairs stock-recruitment dynamics of corals. *Nature.* 2019; 568: 387–390. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1081-y> PMID: 30944475

23. van Oppen MJH, Gates RD, Blackall LL, Cantin NE, Chakravarti LJ, Chan WY, et al. Shifting paradigms in restoration of the world's coral reefs. *Glob Chang Biol.* 2017; 23: 3437–3448. <https://doi.org/10.1111/gcb.13647> PMID: 28247459

24. Anthony K, Bay LK, Costanza R, Firn J, Gunn J, Harrison P, et al. New interventions are needed to save coral reefs. *Nature Ecology & Evolution* 2017 1:10. Nature Publishing Group; 2017; 1: 1420–1422. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0313-5> PMID: 29185526

25. Possingham HP, Bode M, Klein CJ. Optimal Conservation Outcomes Reuire Both Restoration and Protection. Mace GM, editor. *PLOS Biol.* Public Library of Science; 2015; 13: e1002052. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002052> PMID: 25625277

26. Wolanski E, Elliott M. *Estuarine Ecohydrology: An Introduction.* Elsevier; 2015.

27. Brumbaugh RD, Beck MW, Coen LD, Craig L, Hicks P. A practitioner's guide to the design and monitoring of shellfish restoration projects: an ecosystem services approach. repository.library.noaa.gov; 2006.
28. Gillies CL, McLeod IM, Alleway HK, Cook P, Crawford C, Creighton C, et al. Australian shellfish ecosystems: Past distribution, current status and future direction. *PLoS ONE*. journals.plos.org; 2018; 13: e0190914. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190914> PMID: 29444143
29. Gillies CL, Fitzsimons JA, Branigan S, Hale L, Hancock B, Creighton C, et al. Scaling-up marine restoration efforts in Australia. *Ecol Manag Restor*. Wiley/Blackwell (10.1111); 2015; 16: 84–85. <https://doi.org/10.1111/emr.12159>
30. Bruno JF, Valdivia A. Coral reef degradation is not correlated with local human population density. *Sci Rep*. Nature Publishing Group; 2016; 6: 29778. <https://doi.org/10.1038/srep29778> PMID: 27435659
31. Bellwood DR, Pratchett MS, Morrison TH, Gurney GG, Hughes TP, Alvarez-Romero JG, et al. Coral reef conservation in the Anthropocene: Confronting spatial mismatches and prioritizing functions. *Biol Conserv*. Elsevier; 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.056>
32. Young CN, Schopmeyer SA, Lirman D. A Review of Reef Restoration and Coral Propagation Using the Threatened Genus *Acropora* in the Caribbean and Western Atlantic. *B Mar Sci*. University of Miami —Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science; 2012; 88: 1075–1098. <https://doi.org/10.5343/bms.2011.1143>
33. Lirman D, Schopmeyer S. Ecological solutions to reef degradation: optimizing coral reef restoration in the Caribbean and Western Atlantic. Toonen R, editor. *PeerJ*. 2016; 4: e2597. <https://doi.org/10.7717/peerj.2597> PMID: 27781176
34. Chamberland VF, Petersen D, Guest JR, Petersen U, Brittsan M, Vermeij MJA. New Seeding Approach Reduces Costs and Time to Outplant Sexually Propagated Corals for Reef Restoration. *Sci Rep*. Nature Publishing Group; 2017; 7: 18076. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17555-z> PMID: 29273761
35. Heeger T, Cashman M, Sotto F. Coral farming as alternative livelihood, for sustainable natural resource management and coral reef rehabilitation. 1999. pp. 171–186.
36. Heeger T, Sotto F. Coral farming: inexpensive rehabilitation tool and a livelihood option for fisher folk. *Reef Encounter*. 2000; 27: 18–19.
37. Marshall NJ, Kleine DA, Dean AJ. Coral Watch: education, monitoring, and sustainability through citizen science. *Front Ecol Environ*. Wiley Online Library; 2012. <https://doi.org/10.1890/110111>
38. Hesley D, Burdeno D, Drury C, Schopmeyer S, Lirman D. Citizen science benefits coral reef restoration activities. *J Nat Conserv*. Elsevier; 2017; 40: 94–99.
39. Hein MY, Birtles A, Willis BL, Gardiner N, Beeden R, Marshall NA. Coral restoration: Socio-ecological perspectives of benefits and limitations. *Biol Conserv*. Elsevier; 2019; 229: 14–25.
40. Meehl GA, Washington WM, Collins WD, Arblaster JM, Hu A, Buja LE, et al. How Much More Global Warming and Sea Level Rise? *Science*. American Association for the Advancement of Science; 2005; 307: 1769–1772. <https://doi.org/10.1126/science.1106663> PMID: 15774757
41. On Climate Change IP. 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. Intergovernmental Panel on Climate Change; 2018.



42. Knowlton N. The future of coral reefs. *Proc Natl Acad Sci U S A*. National Academy of Sciences; 2001; 98: 5419–5425. <https://doi.org/10.1073/pnas.091092998> PMID: 11344288
43. Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*. 2007; 318: 1737–1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509> PMID: 18079392
44. Mora C, Graham NAJ, Nystrom M. Ecological limitations to the resilience of coral reefs. *Coral Reefs*. Springer Berlin Heidelberg; 2016; 35: 1271–1280. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1479-z>
45. Rinkevich B. Conservation of Coral Reefs through Active Restoration Measures: Recent Approaches and Last Decade Progress. *Environmental Science & Technology*. 2005; 39: 4333–4342. <https://doi.org/10.1021/es0482583> PMID: 16047765
46. Edwards A, Gomez E. Reef restoration: concepts & guidelines. St Lucia, Australia: Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Programme iv. 2007. <https://doi.org/10.1007/s11538-016-0148-2>
47. (null), editor. Reef Rehabilitation Manual. St Lucia, Australia: Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program; 2010.
48. Omori M. Degradation and restoration of coral reefs: Experience in Okinawa, Japan. *Mar Biol Res*. Taylor & Francis; 2011; 7: 3–12.
49. Miller RL, Marsh H, Cottrell A, Hamann M. Protecting Migratory Species in the Australian Marine Environment: A Cross-Jurisdictional Analysis of Policy and Management Plans. *Front Mar Sci*. *Frontiers*; 2018; 5: 211. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00229>
50. Ortega-Argueta A, Baxter G, Hockings M. Compliance of Australian threatened species recovery plans with legislative requirements. *Journal of Environmental Management*. Elsevier; 2011; 92: 2054–2060. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.032> PMID: 21507558
51. Hein MY, Willis BL, Beeden R, Birtles A. The need for broader ecological and socioeconomic tools to evaluate the effectiveness of coral restoration programs. *Restoration Ecology*. Wiley/Blackwell (10.1111); 2017; 25: 873–883. <https://doi.org/10.1111/rec.12580>
52. Wilkinson MD, Dumontier M, Aalbersberg IJ, Appleton G, Axton M, Baak A, et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data* 2016 3. Nature Publishing Group; 2016; 3: 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18> PMID: 26978244
53. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. The SER International Primer on Ecological Restoration. Tucson: Society for Ecological Restoration [www.ser.org](http://www.ser.org); 2004.
54. Gann GD, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson CR, Johnson J, et al. International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration. Washington, D.C. USA: Society for Ecological Restoration.
55. Bayraktarov E, Stewart Sinclair PJ, Brisbane S, Bostroem-Einarsson L, Saunders MI, Lovelock CE, et al. Motivations, success and cost of coral reef restoration. *Restor Ecol*. 2019.
56. Hein MY, Willis BL, Beeden R, Birtles A. The need for broader ecological and socioeconomic tools to evaluate the effectiveness of coral restoration programs. *Restor Ecol*. Wiley Periodicals, Inc; 2017; 25: 873–883.
57. Fadli N, Campbell SJ, Ferguson K, Keyse J, Rudi E, Riedel A, et al. The role of habitat creation in coral reef conservation: a case study from Aceh, Indonesia. *Oryx*. 2012; 46: 501–507. <https://doi.org/10.1017/S0030605312000142>

58. Cruz dela DW, Harrison PL. Enhanced larval supply and recruitment can replenish reef corals on degraded reefs. *Sci Rep.* Springer US; 2017; 7: 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-016-0028-x>
59. Garrison VH, Ward G. Transplantation of storm-generated coral fragments to enhance Caribbean coral reefs: A successful method but not a solution. *Revista de Biología Tropical.* 2012; 60: 59–70.
60. Bowden-Kerby A. Restoration of the threatened *Acropora cervicornis* corals: intraspecific variation as a factor in mortality, growth, and self-attachment. Ft. Lauderdale, Florida, USA; 2008.
61. Mercado-Molina AE, Ruiz-Diaz CP, Sabat AM. Survival, growth, and branch production of unattached fragments of the threatened hermatypic coral *Acropora cervicornis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.* Elsevier; 2014; 457: 215–219.
62. Schopmeyer SA, Lirman D, Bartels E, Gilliam DS, Goergen EA, Griffin SP, et al. Regional restoration benchmarks for *Acropora cervicornis*. *Coral Reefs.* Springer Berlin Heidelberg; 2017; 276: 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00338-017-1596-3>
63. Suggett DJ, Camp EF, Edmondson J, Bostro ¨m-Einarsson L, Ramler V, Lohr K, et al. Optimizing return-on-effort for coral nursery and outplanting practices to aid restoration of the Great Barrier Reef. *Restoration Ecology.* Wiley Online Library; 2019; 27: 683–693.
64. Godefroid S, Piazza C, Rossi G, Buord S, Stevens A-D, Aguraiuja R, et al. How successful are plant species reintroductions? *Biol Conserv.* Elsevier; 2011; 144: 672–682.
65. Sweeney BW, Czapka SJ, Yerkes T. Riparian forest restoration: increasing success by reducing plant competition and herbivory. *Restoration Ecology.* Wiley Online Library; 2002; 10: 392–400.
66. McLeod IM, Bostro ¨m-Einarsson L, Johnson CR, Kendrick GA, Layton C, Rogers AA, et al. The role of restoration for conserving matters of national environmental significance. 2018 p. 186.
67. Plucer-Rosario GP, Randall RH. Preservation of rare coral species by transplantation: an examination of their recruitment and growth. *B Mar Sci.* 1987; 41: 585–593.
68. Newman H, Chuan CS. Transplanting a coral reef: A Singapore community project. *Coastal Management in Tropical Asia.* 1994; 3: 11–14.
69. Thornton SL, Dodge RE, Gilliam DS, DeVactor R, Cooke P. Success and growth of corals transplanted to cement armor mat tiles in southeast Florida: implications for reef restoration. 2000.
70. Gayle PMH, Wilson-Kelly P, Green S. Transplantation of benthic species to mitigate impacts of coastal development in Jamaica. *Revista de Biología Tropical.* 2005; 53: 105–115. PMID: 17465150
71. Seguin F, Le Brun O, Hirst R, Al-Thary I, Dutrieux E. Large coral transplantation in Bal Haf (Yemen): an opportunity to save corals during the construction of a Liquefied Natural Gas plant using innovative techniques. 2008. pp. 1267–1270.
72. Yeemin T, Sutthacheep M, Pettongma R. Coral reef restoration projects in Thailand. *Ocean Coast Manag.* Elsevier; 2006; 49: 562–575.
73. Kilbane D, Graham B, Mulcahy R, Onder A, Pratt M. Coral relocation for impact mitigation in Northern Qatar. Fort Lauderdale, FL, USA; 2008.
74. Kenny I, Kramer A, Wilson Kelly PW, Burbury T. Coral Relocation: A mitigation tool for dredging works in Jamaica. Cairns, Australia; 2012. p. 20A.

75. Rodgers KS, Lorance K, Richards Donà A, Stender Y, Lager C, Jokiel PL. Effectiveness of coral relocation as a mitigation strategy in Kane'ohe Bay, Hawai'i. Reimer J, editor. PeerJ. 2017; 5: e3346. <https://doi.org/10.7717/peerj.3346> PMID: 28560102\
76. Kotb MMA. Coral translocation and farming as mitigation and conservation measures for coastal development in the Red Sea: Aqaba case study, Jordan. Environ Earth Sci. Springer Berlin Heidelberg; 2016; 75: 439. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5304-3>
77. Ferse SCA, Nugues MM, Romatzki SBC, Kunzmann A. Examining the Use of Mass Transplantation of Brooding and Spawning Corals to Support Natural Coral Recruitment in Sulawesi/Indonesia. Restoration Ecology. Wiley Periodicals, Inc; 2013; 21: 745–754. <https://doi.org/10.1111/rec.12004>
78. Rinkevich B. Conservation of Coral Reefs through Active Restoration Measures: Recent Approaches and Last Decade Progress. Environ Sci Technol. 2005; 39: 4333–4342. <https://doi.org/10.1021/es0482583> PMID: 16047765
79. Putchim L, Thongtham N, Hewett A, Chansang H. Survival and growth of *Acropora* spp. in mid-water nursery and after transplantation at Phi Phi Islands, Andaman Sea, Thailand. 2008. pp. 1258–1261.
80. Page CA, Vaughan D. The cultivation of massive corals using “micro-fragmentation” for the ‘reskinning’ of degraded coral reefs. Benthic Ecology Meeting.
81. Forsman ZH, Page CA, Toonen RJ, Vaughan D. Growing coral larger and faster: micro-colony-fusion as a strategy for accelerating coral cover. PeerJ. PeerJ Inc; 2015; 3: e1313. <https://doi.org/10.7717/peerj.1313> PMID: 26500822
82. Carne L, Kaufman L, Scavo K. Measuring success for Caribbean acroporid restoration: key results from ten years of work in southern Belize. 2016.
83. Carne L, Kaufman L, Scavo K. Measuring success for Caribbean acroporid restoration: key results from ten years of work in southern Belize.
84. Calle-Triviño J, Corte´s-Useche C, Sellares-Blasco RI, Arias-González JE. Assisted fertilization of threatened Staghorn Coral to complement the restoration of nurseries in Southeastern Dominican Republic. Regional Studies in Marine Science. Elsevier; 2018; 18: 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.02.002>
85. Linden B, Rinkevich B. Creating stocks of young colonies from brooding coral larvae, amenable to active reef restoration. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. Elsevier; 2011; 398: 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2010.12.002>
86. National Marine Fisheries Service. Recovery Plan for Elkhorn (*Acropora palmata*) and Staghorn (*A. cervicornis*) Corals. Silver Spring, MD; Mar, 2015 p. 167.
87. Jones GP, Almany GR, Russ GR, Sale PF, Steneck RS, Van Oppen M, et al. Larval retention and connectivity among populations of corals and reef fishes: history, advances and challenges. Coral Reefs. Springer; 2009; 28: 307–325.
88. Omori M. Success of mass culture of *Acropora* corals from egg to colony in open water. Coral Reefs. Springer-Verlag; 2005; 24: 563–563. <https://doi.org/10.1007/s00338-005-0030-4>
89. IWAO K, Omori M, Taniguchi H, TAMURA M. Transplanted *Acropora tenuis* (Dana) spawned first in their life 4 years after culture from eggs. Galaxea, Journal of Coral Reef Studies. The Japanese Coral Reef Society; 2010; 12: 47–47.
90. Chamberland VF, Petersen D, Guest JR, Petersen U, Brittsan M, Vermeij MJA. New Seeding Approach Reduces Costs and Time to Outplant Sexually Propagated Corals for Reef Restoration. Sci Rep. nature.com; 2017; 7: 18076. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17555-z> PMID: 29273761

91. Heyward AJ, Smith LD, Rees M, Field SN. Enhancement of coral recruitment by in situ mass culture of coral larvae. *Mar Ecol Prog Ser.* 2002; 230: 113–118. <https://doi.org/10.2307/24865098>
92. Suzuki G, Arakaki S, Suzuki K, Iehisa Y, Hayashibara T. What is the optimal density of larval seeding in *Acropora* corals? *Fisheries Science.* Springer; 2012; 78: 801–808.
93. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. Elsevier, Amsterdam.
94. Perkol-Finkel S, Benayahu Y. Community structure of stony and soft corals on vertical unplanned artificial reefs in Eilat (Red Sea): comparison to natural reefs. *Coral Reefs.* 2004; 23: 195–205.
95. Ferse SCA. Multivariate responses of the coral reef fish community to artificial structures and coral transplants. In: Riegl BM, Dodge RE, editors. Fort Lauderdale, Florida, USA: National Coral Reef Institute, Nova Southeastern University, Dania, Florida; 2009.
96. Williams SL, Sur C, Janetski N, Hollarsmith JA, Rapi S, Barron L, et al. Large-scale coral reef rehabilitation after blast fishing in Indonesia. *Restoration Ecology.* Wiley Online Library; 2019; 27: 447–456.
97. Lindahl U. Coral reef rehabilitation through transplantation of staghorn corals: effects of artificial stabilization and mechanical damages. *Coral Reefs.* 2003; 22: 217–223.
98. Goreau TJ, Hilbertz W. Reef restoration using sea water electrolysis in Jamaica. Panama; 1996.
99. Hilbertz WH. *Electrodeposition of Minerals in Solution and Its Enhancement by Biological Growth for Structural Applications.* University of Texas at Austin; 1976.
100. Sabater MG, Yap HT. Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of  $\text{CaCO}_3$ . *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.* 2002; 272: 131–146. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(02\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(02)00051-5)
101. Goreau TJ, Hilbertz W. Reef restoration using sea water electrolysis in Jamaica. Panama; 1996. p. 75.
102. Van Treeck P, Schuhmacher H. Artificial Reefs Created by Electrolysis and Coral Transplantation: An Approach Ensuring the Compatibility of Environmental Protection and Diving Tourism. *Estuar Coast Shelf S.* Academic Press; 1999; 49: 75–81. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(99\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(99)80011-0)
103. Schuhmacher H, Van Treeck P, Eisinger M, Paster M. Transplantation of coral fragments from ship groundings on electrochemically formed reef structures. 2002. pp. 983–990.
104. Sabater MG, Yap HT. Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of  $\text{CaCO}_3$ . *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.* 2002; 272: 131–146.
105. Sabater MG, Yap HT. Long-term effects of induced mineral accretion on growth, survival and corallite properties of *Porites cylindrica* Dana. *J Exp Mar Bio Ecol.* 2004; 311: 355–374.
106. Eisinger M. Beitrage zu o'kologischen und o'konomischen Aspekten der Korallentransplantation auf elektrochemisch erzeugte Substrate als Methode zur Rehabilitation degradierteter Korallenriffe. Department Biology and Geography. University of Duisburg-Essen; 2005.
107. Romatzki SBC. Influence of electrical fields on the performance of *Acropora* coral transplants on two different designs of structures. *Mar Biol Res.* Taylor & Francis; 2014; 10: 449–459.

108. Borell EM, Romatzki SBC, Ferse SCA. Differential physiological responses of two congeneric scleractinian corals to mineral accretion and an electric field. *Coral Reefs*. 2010; 29: 191–200.
109. Lake PS. On the maturing of restoration: linking ecological research and restoration. *Ecol Manag Restor*. Wiley Online Library; 2001; 2: 110–115.
110. Shaver EC, Burkepille DE, Silliman BR. Local management actions can increase coral resilience to thermally-induced bleaching. *Nat Ecol Evol*. 2018; 2: 1075–1079. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0589-0> PMID: 29915342
111. Bruno JF, Coates JM, Toth LT. Climate change, coral loss, and the curious case of the parrotfish paradigm: Why don't marine protected areas improve reef resilience? *Annu Rev Marine Sci*. Annual Reviews; 2019; 11: 307–334.
112. Rinkevich B. Conservation of Coral Reefs through Active Restoration Measures: Recent Approaches and Last Decade Progress. *Environmental Science & Technology*. 2005; 39: 4333–4342. <https://doi.org/10.1021/es0482583> PMID: 16047765
113. Ferse SCA. Poor Performance of Corals Transplanted onto Substrates of Short Durability. *Restoration Ecology*. 2010; 18: 399–407. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00682.x>
114. Hunt J, Sharp W. Developing a comprehensive strategy for coral restoration for Florida. *State Wildlife Grant Award T-32-R*. 2014;1169.
115. Johnson ME, Lusic C, Bartels E, Baums IB, Gilliam DS, Larson EA, et al. Caribbean Acropora restoration guide: best practices for propagation and population enhancement. 2011.
116. McDonald T, Gann GD, Jonson J, Dixon KW. International standards for the practice of ecological restoration—including principles and key concepts. 1st ed. Washington, D.C.: Society for Ecological Restoration; 2016.
117. Shaver EC, Silliman BR. Time to cash in on positive interactions for coral restoration. Bruno J, editor. *PeerJ*. 2017; 5: e3499. <https://doi.org/10.7717/peerj.3499> PMID: 28652942
118. Ladd MC, Miller MW, Hunt JH, Sharp WC, Burkepille DE. Harnessing ecological processes to facilitate coral restoration. *Frontiers in Ecology and the Environment*. John Wiley & Sons, Ltd; 2018; 16: 239–247. <https://doi.org/10.1002/fee.1792>
119. Edwards AJ, editor. Reef Rehabilitation Manual. St Lucia, Australia: Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program; 2010.
120. Fisk D, Job S, Khan Z, Alefaio S, Moeava T. FUNAFUTI ATOLL. 2008.
121. Edwards AJ, editor. Reef Rehabilitation Manual. St Lucia, Australia: Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program; 2010.
122. Ammar MSA, Others. Coral reef restoration and artificial reef management, future and economic. *The Open Environmental Engineering Journal*. researchgate.net; 2009; 2: 37–49.
123. Ferse SC, Costa MM, Manez KS, Adhuri DS, Glaser M. Allies, not aliens: increasing the role of local communities in marine protected area implementation. *Envir Conserv*. Cambridge University Press; 2010; 37: 23–34.
124. Okubo N, Taniguchi H, Motokawa T. Successful methods for transplanting fragments of *Acropora formosa* and *Acropora hyacinthus*. *Coral Reefs*. 2005; 24: 333–342.
125. Bowden-Kerby A. Low-tech coral reef restoration methods modeled after natural fragmentation processes. *B Mar Sci*. University of Miami-Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science; 2001; 69: 915–931.
126. O'Neil KL. Land-based coral nurseries: A valuable tool for production and transplantation of *Acropora cervicornis*. 2015.

127. Yap HT, Alvarez RM, Custodio HM, Dizon RM. Physiological and ecological aspects of coral transplantation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 1998; 229: 69–84.
128. Tagliafico A, Rangel S, Christidis L, Kelaher BP. A potential method for improving coral self-attachment. *Restoration Ecology*. 2018; 88: 61. <https://doi.org/10.1111/rec.12698>
129. Shaish L, Levy G, Katzir G, Rinkevich B. Employing a highly fragmented, weedy coral species in reef restoration. *Ecological Engineering*. 2010; 36: 1424–1432. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.022>
130. Mbiye NE, Spanier E, Rinkevich B. A first endeavour in restoring denuded, post-bleached reefs in Tanzania. *Estuar Coast Shelf S*. 2013; 128: 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.04.021>
131. Griffin S, Spathias H, Moore T, Baums I, Griffin B. Scaling up *Acropora* nurseries in the Caribbean and improving techniques. *ARC Centre of Excellence for Coral Reef Studies Townsville*; 2012. pp. 1–5.
132. Yap HT, Gomez ED. Growth of *Acropora pulchra*. II. Responses of natural and transplanted colonies to temperature and day length. *Marine Biology*. 1984; 81: 209–215.
133. Soong K, Chen T-A. Coral Transplantation: Regeneration and Growth of *Acropora* Fragments in a Nursery. *Restor Ecol*. 2003; 11: 62–71.
134. Chilcoat GC. Growth and survival of transplanted *Acropora cervicornis* in relation to coral reef restoration. 2004.
135. Becker LC, Mueller E. The culture, transplantation, and storage of *Montastraea faveolata*, *Acropora cervicornis*, and *A. palmata*: what we learned so far. *Bull Mar Sci*. 2001; 69: 881–896.
136. Pausch RE, Williams DE, Miller MW. Impacts of fragment genotype, habitat, and size on outplanted elkhorn coral success under thermal stress. *Mar Ecol Prog Ser*. 2018; 592: 109–117. <https://doi.org/10.3354/meps12488>
137. Bruckner A, Bruckner R. Condition of restored *Acropora palmata* fragments off Mona Island, Puerto Rico, 2 years after the Fortuna Reefer ship grounding. *Coral Reefs*. Springer-Verlag; 2001; 20: 235–243. <https://doi.org/10.1007/s003380100164>
138. Babcock RC. Comparative demography of three species of scleractinian corals using age- and size dependent classifications. *Ecol Monogr*. 1991; 61: 225–244.
139. Cabaitan PC, Yap HT, Gomez ED. Performance of single versus mixed coral species for transplantation to restore degraded reefs. *Restoration Ecology*. Wiley Periodicals, Inc; 2015; 23: 349–356. <https://doi.org/10.1111/rec.12205>
140. McDonald T, Jonson J, Dixon KW. National standards for the practice of ecological restoration in Australia. *Restoration Ecology*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111); 2016; 24: S4–S32. <https://doi.org/10.1111/rec.12359>
141. Worrell E, Price L, Martin N, Hendriks C, Meida LO. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu Rev Energy Environ*. Annual Reviews; 2001; 26: 303–329.
142. Allen AS, Seymour AC, Rittschof D. Chemoreception drives plastic consumption in a hard coral. *Mar Pollut Bull*. Elsevier; 2017; 124: 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.030> PMID: 28743368
143. Lamb JB, Willis BL, Fiorenza EA, Couch CS, Howard R, Rader DN, et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*. American Association for the Advancement of Science; 2018; 359: 460–462. <https://doi.org/10.1126/science.aar3320> PMID: 29371469
144. Anthony K, Bay LK, Costanza R, Firn J, Gunn J, Harrison P, et al. New interventions are needed to save coral reefs. *Nat Ecol Evol*. 2017; 1: 1420–1422. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0313-5> PMID: 29185526