

Янин Е.П. Коралловые рифы: деградация и проблемы охраны // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2004, № 9, с. 49-91.

Введение

Рифообразующие (иначе герматипные) кораллы широко распространены в тропической зоне Мирового океана и наряду с мангровыми зарослями являются характерной ее особенностью. Именно поэтому тропическая зона Мирового океана часто рассматривается как особая природная зона - коралловая зона, или зона коралловых рифов, которые здесь имеют такое значение, как травостой для зоны степей или хвойные породы деревьев для зоны тайги [27]. В большинстве публикаций приводятся весьма приближенные данные о площади живых коралловых рифов, причем известные мнения по этому вопросу очень различны - называются цифры от 150 тыс. до 7-8 млн. км² [27]. По мнению авторов цитируемой работы, последняя величина более правдоподобна. По данным [40], площадь, занимаемая рифообразующими организмами, составляет, вероятно, не менее 6 млн. км². По другим сведениям [24], коралловые рифы занимают площадь менее 1 млн. км²; эта величина того же порядка, что и площадь районов апвеллинга. Есть также сведения, что коралловые рифы занимают не более 0,1% от площади земного шара и дают 0,9% общей первичной продукции на Земле [123]. В любом случае, как справедливо отмечают авторы известной книги [27], с коралловыми рифами необходимо считаться как с географическим явлением, играющим существенную роль не только в пределах тропической зоны, но и в масштабах всего Мирового океана.

Коралловые рифы образуют геологический фундамент тысячи островов, являются основой экономики многих стран Карибского бассейна и Тихоокеанского региона и главным источником пищевых продуктов для сотен миллионов людей. В настоящее время коралловые рифы дают средства существования 500 млн. человек и ежегодно приносят в мировую экономику 400 млрд. долл. [74]. Они имеют большую рекреационную и эстетическую ценность, являются поставщиками разнообразного минерального сырья и медико-фармацевтических ресурсов. По словам Германа Мелвилла, коралловые рифы - эти огромные естественные волноломы - как бы созданы для того, чтобы охранять сушу [25]. Действительно, коралловые рифы защищают берега от разрушительного воздействия волн и прибоев, а низменные участки побережья - от затопления.

В прибрежных песках коралловых островов встречаются россыпи тяжелых металлов; на некоторых островах разрабатываются месторождения фосфоритов, строительных материалов, добываются перламутр и жемчуг. Известняковые толщи Большого Барьерного рифа содержат

нефть и газ. Известно, что коралловые рифы в минувшие геологические эпохи были распространены значительно шире, чем теперь, что, несомненно, связано с особенностями палеоклимата. Есть сведения, что с ископаемыми рифами связано до 60% нефтеносных горизонтов во многих нефтегазоносных бассейнах (в том числе, в Волго-Уральской провинции в нижнепермских отложениях, например Ишимбайское месторождение). Естественно, что без знания биологии и экологии современных герматипных кораллов, закономерностей развития, роста и гибели современных рифов специалистам в области геологии нефти и газа трудно получить правильное представление о рифах ископаемых.

Коралловые рифы - самые грандиозные сооружения, которые когда-либо создавались организмами на Земле. Один атолл средней величины вырабатывает около 500 км^3 строительного материала, что в 250 раз больше объема зданий Нью-Йорка [21]. Есть сведения, что Большой Барьерный риф виден даже с Луны [42].

Природа многих коралловых островов сильно изменена человеком. На некоторых из них плотность населения достигает 1000 чел/км^2 ; земли используются в высшей степени интенсивно (плантации, огороды и др.). Нефтяное загрязнение уже оказывает негативное влияние на самые отдаленные коралловые острова [19]. Если не принять кардинальных мер, считают ученые, то коралловые рифы во всем мире окажутся под угрозой исчезновения; состояние 70% из них уже вызывает тревогу [96]. Эти рифы могут исчезнуть к 2050 г. По другим оценкам, деструктивная деятельность человека поставила под угрозу 60% мировых коралловых рифов [51], а к 2028 г. может быть разрушено 40% мировых коралловых рифов (Известия, 1999, 11 февраля). Очень часто самые острые экологические проблемы связаны с загрязнением морской среды и сверхэксплуатацией рыбных ресурсов. Однако коралловые рифы настолько хрупки, что даже менее серьезные проблемы нельзя игнорировать. Среди них - сбор кораллов, ловля рыбы и других организмов для аквариумов, использование кораллов в ювелирной промышленности, а также поставки живой рыбы для ресторанов. В прибрежной полосе многих стран мира усиливается рекреационный пресс, в т. ч. в связи с бурным строительством отелей на побережье [69, 89]. Уже сейчас при разрушении коралловых рифов, мангров и островных систем ежегодно исчезает около 3000 видов живых организмов [98].

В последние годы коралловым рифам отводится особая роль в изучении парникового эффекта и глобальных изменений состояния окружающей среды. Например, Геологическая служба Японии активно проводит исследования способности рифов к связыванию CO_2 , изменений в окружающей среде по годичным слоям рифов, механизм образования рифов и его связь с изменениями уровней моря и климата. Изучение экосистем коралловых островов дает информацию о долгосрочной динамике океанических и климатических условий [100].

В настоящее время охрана коралловых рифов, - справедливо полагают многие ученые, - является уже глобальной проблемой, требующей своего быстрого разрешения [52, 105].

1. Общая характеристика коралловых рифов

Живой коралловый риф сочетает в себе черты геологической и биологической структур. В этом уникальном биогеологическом комплексе главное место принадлежит герматипным (рифостроящим) кораллам. По своему систематическому положению они относятся к типу кишечно-полостных (*Coelenterata*), классу коралловых полипов (*Anthozoa*) и преимущественно к отряду мадрепоровых кораллов (*Madreporaria*) из подкласса шестилучевых кораллов (*Hexacorallia*) [2]. Кораллы бывают одиночные и колониальные. Типичный представитель одиночных кораллов - актиния. Большинство мадрепоровых кораллов - животные колониальные, обладающие хорошо развитым скелетом. Колония кораллов состоит из большого числа маленьких полипов, соединенных с общим телом колонии своими нижними концами, т. е. у колониальных полипов подошва отсутствует, а их кишечные полости непосредственно или через систему каналов соединены между собой. Считается, что примерно 60% из ныне живущих родов кораллов состоят из таких колоний [3]. Форма колоний *Madreporaria* отличается большим разнообразием. По положению на субстрате они делятся на стелющиеся и вздымающиеся (массивные, пластинчатые или разветвленные). Среди массивных колоний можно выделить шаровидные, комковатые и пористые, среди пластинчатых - листовидные и ячеистые, а разветвленные колонии могут быть древовидными и дисковидными. В настоящее время насчитывается около 550 видов мадрепоровых кораллов, которые распределены между 110 родами. В Индийском и Тихом океанах насчитывается до 500 видов, относящихся к 80 родам, остальные обитают на рифах Атлантического океана [27]. Несмотря на пестроту и мозаичность распределения кораллов на рифе и их значительное видовое разнообразие, установлено, что основу сформировавшегося кораллового биоценоза обычно составляют не более 10-15 руководящих форм мадрепоровых кораллов и 1-2 вида гидрокораллов [27]. Лишь в редких случаях на рифе преобладают кораллы других систематических групп.

Помимо мадрепоровых кораллов, в строительстве рифов принимают участие и другие *Anthozoa*, имеющие скелет (мягкие кораллы, солнечные кораллы, роговые кораллы, или горгонарии, и др.), а также представители класса гидроидных - гидрокораллы (отряд *Stylasterida*). Очевидно, что к герматипным организмам нужно отнести некоторые известковые красные (семейство кораллиновые *Corallinaceae*) и зеленые (семейство каулерповые *Caulerpaceae*) водоросли. Ограниченное участие в строительстве рифов принимают простейшие, кольчатые черви, брюхоногие и двустворчатые моллюски, иглокожие (морские ежи и морские звезды),

способствующие накоплению извести на рифе. Найдены рифы, построенные крупными, до 80 мм, усоногими раками рода *Balanus* [110].

Анализ видового состава мадрепоровых кораллов в разных районах Мирового океана позволяет выделить в тропических водах две зоогеографические области - Атлантическую и Индо-Пацифическую и установить основные центры видообразования. В Индо-Пацифической области таких центров два: один лежит между Филиппинами, Новой Гвинеей и Малаккой, другой в Красном море. В Атлантике центр один - Карибское море.

1.1. Экологические условия существования коралловых рифов

Для образования кораллового рифа требуются определенные условия [2, 19, 27, 29]. Распространение коралловых поселений в океане определяется рядом факторов внешней среды. Решающий из них - температура, понижение которой ниже 20,5°C и повышение выше 30°C делает невозможным размножение герматипных организмов. Самая низкая температура, при которой они способны существовать, равна 18°C, но половое размножение в этих условиях становится уже невозможным, а вегетативное размножение (выпочковывание новых полипов) и рост крайне замедляются. При опускании температуры воды ниже 18°C рифообразующие кораллы погибают. Оптимальные границы температуры, необходимой для физиологической активности скелетообразования у кораллов, лежат в пределах 25-27°C. В указанных температурных пределах возможность существования рифов зависит от определенной солености (не менее 30-31‰), освещенности, насыщенности воды кислородом, наличия твердого субстрата. Необходимо подчеркнуть, что важны не только абсолютные значения отмеченных выше факторов, но и их стабильность, отсутствие резких колебаний их значений, поскольку кораллы отличаются высокой стенобионтностью, т. е. не способны выносить сколько-нибудь значительных отклонений от оптимальных для них показателей состояния среды обитания. Например, всякое, даже незначительное (на 2-3‰) и кратковременное изменение солености, особенно ее понижение, действует на коралловый риф губительно. Обычно кораллы развиваются от литорали до глубины 50-80 м как вблизи берегов, так и в открытых водах. Однако наибольшее разнообразие форм герматипных кораллов и самая высокая плотность их поселений наблюдается до глубины 15-25 м, т. е. в пределах зоны наибольшей освещенности. Многие кораллы практически не встречаются на заиленных участках. Тем не менее, известно, что определенное число видов рифообразующих кораллов вполне успешно развиваются и живут в лагунах с илистым дном [27]. При прочих равных условиях распространение коралловых рифов в Мировом океане зависит в первую очередь не от географической широты местности, а от температуры воды. При этом конфигурация северных и южных границ ареала их распро-

странения непосредственно связана с прохождением струй холодных и теплых поверхностных океанических течений. Самые северные коралловые рифы находятся южнее полуострова Корея и близ Суэца.

1.2. Основные типы и строение коралловых рифов

Со времен Ч. Дарвина [9, 10] принято различать три варианта последовательно развивающихся коралловых построек: береговой риф, барьерный риф и атолл (являющийся завершающей стадией развития коралловых рифов). В настоящее время теория возникновения и развития коралловых островов, предложенная Дарвиным, получила убедительное фактическое подтверждение, а последующие исследования лишь уточняют и конкретизируют дарвиновскую концепцию [27]. В частности, детальный анализ структуры рифов, закономерностей их роста и особенно результаты глубокого бурения на атоллах однозначно подтверждают справедливость дарвиновского положения о том, что формирование кольцевых коралловых структур - атоллов связано с медленным опусканием морского дна. Считается, что слово «риф» - как навигационный термин, который обозначает мели, представляющие опасность при мореплавании, - впервые применил Дж. Кук.

Окаймляющие, или береговые рифы, тянутся вдоль берега и отделены от него промежуточной зоной с песчаным дном, которую называют лагуной. Обычно ширина самого рифа не превышает 50 м. Наиболее распространены береговые рифы у побережья Восточной Африки, у островов Индо-Австралийского архипелага. С геоморфологической точки зрения коралловые рифы рассматриваются как особый тип биогенных берегов [18]. В каждом конкретном случае возможно более детальное разделение рифов по их расположению относительно берегов и геоморфологическим особенностям. Например, Ю.Я. Латыпов [22] разделяет окаймляющие рифы юго-восточного Вьетнама по геоморфологическому положению, степени прибойности и характеру связи берега с открытым морем на три группы: 1) рифы внутренних бухт, 2) рифы проливов между материком и крупными островами, 3) рифы открытых мысов и островов. Китайские исследователи в строении кораллового рифа в районе Денглоуджао (полуостров Лейжу, Китай) различают следующие экологические зоны [118]: 1) голая поверхность во внутренней части рифа, 2) слабо зарастающая поверхность во внешней части фронтального склона.

Барьерные рифы, образовавшиеся из окаймляющих рифов, находятся на расстоянии нескольких километров от берега; лагуна между побережьем и рифами достигает значительной глубины, а сам риф более мощный. Так, Большой Барьерный риф у северного побережья Австралии достигает в длину 2 тыс. км, в ширину от 30 до 150 км; его высота составляет 2000 м,

общая площадь морского дна, занятая кораллами, достигает почти 200 000 км²; объем органического материала 16000 км³. Основу данного природного образования составляет мощная (1000-12000 м) толща коралловых известняков, сформировавшаяся за несколько миллионов лет из отмерших кораллов. Строительный объем рифа почти в 100 тыс. раз превышает Великую китайскую стену. Мощный барьерный риф, длиной 1500 км и шириной 0,2-1 км, окружает остров Новая Каледония в Тихом океане. Несколько меньший коралловый комплекс архипелага Фарасан расположен у побережья Йемена. Длина его 500 км, ширина 50 км.

Атоллы имеют более или менее кольцевидную форму. Атолл - на языке жителей Мальдивских островов (в состав которых входят 1190 коралловых островов) - означает «государство». Атолл всегда окружает лагуну, глубиной 30-60 м. Расположены кольцевидные рифы преимущественно в центральной части Индийского океана (Мальдивские и Лакадивские о-ва), а также в западной и центральной частях Тихого океана; небольшие кольцевидные рифы известны в Красном море. Часто внутри атоллов обнаруживаются так называемые миниатюрные атоллы (микроатоллы, или фаросы, типичным примером которых являются Мальдивские острова), иногда встречающиеся и независимо, например в Красном море у берегов Саудовской Аравии, о которых Э. Хемингуэй писал, что «таких красивых рифов нигде больше не увидишь» [35, с. 80]. Одним из самых маленьких атоллов мира является атолл Роуз (с 2 островками - Роуз и Сэнд); он лежит на восточном конце вулканической цепи Самоа в 240 км от Паго-Паго. Ширина рифа 0,5 км, протяженность лагуны 2 км, площадь лагуны с рифом 640 га, глубина лагуны до 20 м; единственный узкий проход имеет глубину до 15 м. Атолл, открытый в 1772 г. Я. Роггевеном и впервые исследованный судном США «Весанн» в 1839 г., с 1973 г. заповедан. Его уникальная особенность - доминирование инкрустирующих кораллиновых водорослей и обилие мягких кораллов на рифе. К настоящему времени этот атолл, судя по всему, является и наиболее изученным коралловым рифом мира. В частности, посвященная ему библиография насчитывает 297 работ - от популярных до научных [107].

Среди других типов коралловых построек различают внутрелагуные рифы, столовые рифы (коралловые банки), коралловые бугры (пятнистые или островерхие рифы) [18, 41, 59].

На каждом рифе можно выделить отдельные участки - зоны, отличающиеся как по условиям обитания на них, так и по населению. Биоконструкционная часть включает в себя рифорок с особенно интенсивно растущими участками - шпорами и прилежащий к ним район риф-флета. Аккумулятивная часть представлена зонами риф-флета, обращенными к берегу или центральной лагуне. За риф-флетом могут лежать береговой канал и песчаный пляж. Зональная структура конкретного рифа и соотношение зон в конечном итоге определяют его лицо. С литолого-петрографической точки зрения в сложных рифовых образованиях часто различают три части [40]: 1) остов рифа, 2) шлейф обломков, одевающий его склон, 3) отложения лагун

между рифами. Остов рифа состоит из массивного, но обычно пористого скопления кораллов, водорослей и других организмов (так называемый биогерм). Склоны рифа, обращенные в сторону моря, слагаются обломками биогермного сооружения, разрушаемого прибоем. У края рифа этот шлейф обломочного материала состоит из глыб и галек, затем из известковых песков и, наконец, из тончайших илов. Облекая остов рифа, он залегает со значительными углами уклона (8-17°, иногда и до 60°). В зависимости от силы прибоа и течений углы наклона могут меняться в разных слоях. Во внутренних лагунах между рифами или рифом и берегом отлагаются преимущественно тончайшие продукты измельчения того же рифа или химически выпавшие микрозернистые микрослоистые известняки. Они резко отличаются от массивных известняков биогерма, но содержат отдельные небольшие биогермы. Ископаемые отложения рифового типа могут иметь различный облик в зависимости от условий и места их образования. Для платформенных рифов более характерно линейное расположение, для геосинклинальных - кольцевое. Совершенно различный облик они имеют в зависимости от того, происходило ли их образование в условиях поднятия или в условиях опускания.

В открытой акватории океана на коралловых рифах формируются так называемые биогенные острова. Природно-территориальный комплекс островов типичных кораллов - это довольно однообразный пальмовый лес (насаждения) на карбонатной почве низкой плоской морской террасы [6]. Внутренняя однородность комплексов predeterminedена их молодым возрастом (в большинстве случаев до 3-4 тыс. лет) и небольшими размерами. Они соответствуют одному элементу рельефа - кольцевому рифу и имеют на всем протяжении однородную литогенную основу. При формировании природно-территориального комплекса ведущую роль играют динамические процессы океана и атмосферы: 1) движение воды, вызывающее перемещение и аккумуляцию наносов, слагающих острова; 2) движение воздуха, непосредственно влияющие на растительный покров, приносящие соли с брызгами воды, перемещающие песчаный материал. Волновые процессы имеют большое влияние на формирование внешнего края атоллов, где формируется своеобразный рельеф поперечных ложбин и происходит разрушение колоний кораллов [18]. Зональные различия природно-территориальных комплексов островов разных групп атоллов обусловлены увлажнением и отчетливо проявляются в видовом многообразии растительности и типах растительных сообществ [6]. Поднятые атоллы представляют собой своеобразные известняковые плато, где присутствуют залежи фосфоритов. Вулканические острова включают коралловые рифы с природными комплексами, близкими атолловым островам. Коралловые рифы находятся в ассоциации с глубоководными осадками.

1.3. Живой мир и продуктивность коралловых рифов

Коралловые сообщества представляют собой наиболее характерный и самый значительный по общей биомассе и продуктивности тип морских тропических донных биоценозов; коралловые рифы - богатейшая среда обитания на Земле, которая не уступает тропическим лесам по продуктивности. Как однажды заметил А. Шамиссо, «для изучения madreporовых и других кораллов требуется целая человеческая жизнь» [37, с. 152]. Действительно, общее количество видов организмов, связанных с биоценозами коралловых рифов в Тихом и Индийском океанах, приближается к 125 тыс., в Атлантическом океане их около 25 тыс. [27]. На рифах Индийского и Тихого океанов в общей сложности обитает около 2200 видов коралловых рыбок, на рифах Атлантического океана - 600. На коралловых рифах встречается не менее 6000 видов моллюсков, главным образом из классов брюхоногих и пластинчато-жаберных; головоногие представлены несколькими видами небольших осьминогов, обычно встречающихся редко. Например, к рифовым сообществам Индийского и Тихого океанов приурочено около 5000 видов моллюсков, в Атлантическом океане их насчитывается около 1200. Большинство обитающих на рифах рыб, ракообразных, моллюсков, иглокожих, червей, за исключением случайных поселенцев, в той или иной степени связаны с самими кораллами. В пределах Большого Барьерного рифа обитает три с лишним тысячи видов животных; 32% беспозвоночных Гавайских рифов уникальны.

Организмы, которые вступают с кораллами в непосредственный экологический контакт, называют кораллобионтами [27]. Одни из них по отношению к кораллам ведут себя как хищники, поедая колонию целиком, но таких немного. Другие разрушают коралловые постройки подобно вредителям растений - это деструкторы. Если деструктора интересуют мягкие ткани коралла, то это текстворатор (таковы многие коралловые рыбы); если же деструктор разрушает только скелет, часто уже лишенный мягких тканей, что характерно для сверлящих двустворчатых моллюсков и иглокожих, то это калькаротеребратор. Большая часть кораллобионтов может быть отнесена к разряду симбионтов. Среди них есть мутуалисты, паразиты и комменсалы. Мутуалистов немного; но к ним относятся жизненно необходимые кораллам симбиодииумы (одноклеточные водоросли из динофлагеллят), от которых в значительной степени зависит благополучие и самих кораллов, и, следовательно, всего биоценоза. Паразитов тоже немного. Основная часть кораллобионтов принадлежит к комменсалам. Одни комменсалы получают у кораллов квартиру, добывая пищу независимо от хозяина; другие забираются на колонию и даже проникают в отдельные кораллиты, не повреждая, однако, при этом полипов; третьи просто довольствуются близостью к кораллам, используя их в качестве убежища в критических ситуациях.

Совокупность коралла с его кораллобионтами образует до известной степени замкнутую экологическую систему. Состав, численность и биомасса кораллобионтов зависят прежде всего от формы колонии и ее структуры, вид коралла-хозяина имеет меньшее значение. Чем больше расчленена колония, чем больше на ней образуется различных убежищ, тем богаче и разнообразнее ее население. Велик и удельный вес кораллобионтов в общей биосфере рифа. На 1 м² полипняка может приходиться по весу втрое больше животных по сравнению с лишенными кораллов участками. Значительно выше и видовое разнообразие кораллобионтов [27]. Подавляющее большинство кораллобионтов никогда не покидает своего хозяина.

Существующие на коралловых рифах ассоциации водорослей с беспозвоночными можно рассматривать как стабильные сложные организмы с признаками, обеспечивающими им занятие ниш, недоступных для каждого из компонентов по отдельности [66]. Водоросли динофлагелляты из семейства *Dinophyceae* образуют мутуалистические связи с кораллами. Они обеспечивают своих хозяев не только продуктами фотосинтеза, но и в качестве побочного эффекта вызывают осаждение карбоната кальция, что дает возможность строить скелет полипа, иначе бы коралловые рифы не существовали.

Одна из главных причин изобилия жизни на рифе и высоких темпов пополнения органики кроется в том, что мягкие ткани мадрепоровых кораллов, а именно энтодерма, буквально переполнены одноклеточными водорослями - симбиодиниумами (их нередко, особенно в старой биологической литературе, называют еще «зоохлореллами», «зооксантеллами») [27]. Научное название этого вида - симбиодиниум микроадриатикум (*Symbiodinium microadriaticum*). Ближайшие родственники симбиодиниумов - гимнодиниумы обитают в воде сфагновых болот. Симбиодиниум не встречается в свободном состоянии, т. е. в морской воде, зато он способен вступить в симбиотические взаимоотношения со многими беспозвоночными животными. Отдельная клетка симбиодиниума имеет вид округлого тельца диаметром около 0,005 мм. Снаружи она одета тонкой оболочкой, а внутри нее хорошо заметны ядро, желтоватый хлоропласт и зерна запасных питательных веществ. Количество симбионтов в теле коралла невероятно велико: на каждый квадратный сантиметр поверхности полипа приходится около миллиона водорослевых клеток. Детальные исследования, проведенные с использованием радиоактивных изотопов, позволили проследить циркуляцию углерода, фосфора, азота в биоценозе и установить, что система коралл - симбиодиниумы представляют собой единое целое, компоненты которого не способны к самостоятельному существованию. Симбиотическое сочетание герматипный коралл - симбиодиниумы следует рассматривать в качестве единого организма, т. е. рифообразующие кораллы могут служить единственным примером животных-продуцентов [27]. Продукты обмена полипов усваиваются водорослями, которые, в свою очередь, снабжают коралл кислородом. Симбиодиниумы включены в процесс выделения корал-

лом скелета, темпы формирования которого при удалении водорослей снижаются в 10 раз. Более того, в системе коралл - водоросль существует циркуляция фосфора и азота, резко снижающая потребность поступления этих элементов из внешней среды. Герматипные кораллы работают как аккумулятор биогенных элементов, обеспечивающий благополучие всего биоценоза. Потери органики с живого активного рифа минимальны, и он может считаться замкнутой экосистемой.

Собственно наземные фауна и флора коралловых островов чрезвычайно бедны [1, 27]. Среди растений, произрастающих в зоне пляжа, встречаются ипомея двулопастая и сцеволы; дальше от окраин островов растут кокосовые пальмы и панданус кровельный; ближе к центру островов - встречаются пизония большая и казуарины. На атоллах живут некоторые типы сцинков и гекконов; млекопитающие представлены лишь домашними животными (на некоторых крупных атоллах - это одичавшие домашние свиньи). Крысы, встречающиеся почти повсеместно, несомненно, попали на атоллы вместе с человеком. Ящерицы, мелкие наземные моллюски занесены на плавающих стволах деревьев, летающие насекомые (стрекозы, бабочки) попали сюда по воздуху. Наиболее обычными эндемичными формами являются некоторые виды улиток и ракообразных, такие, как сухопутные раки-отшельники ценобиты и краб - пальмовый вор. Доминирующие позвоночные этих мест - птицы (до 40 видов), гнездящиеся или отдыхающие на атоллах во время миграции. Они практически все связаны с морем (фрегат, буревестник, крачки, глупыши, ржанки, песочники, некоторые утки и др.).

В океане коралловым рифам принадлежит значительная часть бентосной продукции; количество хлорофилла на единицу поверхности (реальной поверхности, а не ее проекции на горизонтальную плоскость) кораллов имеет тот же порядок, что и в листьях сухопутных растений, а биомасса симбиотических водорослей может составлять до 5% и более от биомассы их хозяев [24]. По Ю. Одуму [28], рифовые сообщества атолла Эневеток в 120 раз продуктивнее окружающих сообществ открытого океана. Эффект проявления огромной биологической продуктивности на фоне олиготрофных водных масс получил в экологической литературе название «главного парадокса Кораллового рифа». Коралловые рифы соперничают с тропическими лесами по продуктивности. В частности, средняя первичная продуктивность (г/год/м²) влажных тропических вечнозеленых лесов составляет 2200, кораллового рифа - 2500, лесов северного полушария - 800, агроэкосистем - 650, шельфа - 360, зоны апвеллинга - 500 [30]. Сообщество кораллового рифа также сложно структурировано, разнообразно и динамично, как и дождевой тропический лес. Коралловая колония, по образному выражению Д. Эттенборо [44], - настоящие джунгли моря. Высокая плотность популяций, свойственная коралловым рифам, порождает свои трудности, в частности интенсивное соперничество. Как правило, любое обогащение воды питательными веществами вызывает нарушение симбиоза. Но существуют ис-

ключения: мадрепоровый коралл из рода *Oculina* расширяет свой ареал в прибрежных водах и бухтах Средиземноморья даже в условиях загрязнения. Структура рифов может эффективно стимулировать и направлять конвективную циркуляцию или отклонять горизонтальные течения, улучшая в результате условия поглощения питательных веществ из воды. Коралловые рифы дают прекрасные примеры организации пространства [24].

Коралловые рифы обладают высокой скоростью роста по сравнению с другими экосистемами Земли. Скорость их роста в 1000 раз выше скорости седиментации глубоководных океанических осадков [20]. Коралловые рифы как единое сооружение растут медленнее, чем единичные кораллы. Скорость роста последних в зависимости от местонахождения изменяется в пределах от нескольких мм до 20 см в год. Максимальные значения характерны для ветвистых кораллов, минимальные - для массивных кораллов. В большинстве случаев скорость роста колеблется в пределах 1-5 мм/год. Самым медленным оказывается рост коралловых плато и небольших кустовидных и куполовидных рифов. По имеющимся данным, скорость роста древних, доплейстоценовых, коралловых рифов оценивается в среднем примерно в 1 мм/год. В период после ледниковой трансгрессии скорость роста коралловых рифов составляла примерно 5 мм/год. Обычно замедление роста кораллов наблюдается с возрастом, в период размножения, в период дождей (из-за увеличения мутности и опреснения воды), а также при ослабевании ветра, доставляющего кораллам кислород и питательные вещества, но главным экологическим фактором, определяющим темпы роста, считается температура воды. Массивные кораллы обычно растут со скоростью около 1 см в год; верхушки более легких, ветвящихся кораллов - до 10 см/год [34]. Скорость роста коралловых построек у побережья Флориды определена в около 4 см в год; продуктивность измеряется астрономическими цифрами: по данным автора, общая длина ветвей колоний этих кораллов в 10 особей при ежегодном ветвлении за 10 лет теоретически может составить 60 км [112].

1.4. Физико-географические и геохимические особенности коралловых рифов

Геоботанические, гидрологические и геохимические особенности, а также направленность биогеохимических процессов, протекающих в наземных ландшафтах атоллов, в значительной степени определяются морфологией и геологическим строением последних. С этой точки зрения различают так называемые низкие атоллы и высокие (поднятые) атоллы [13]. Низкие острова обладают высотой не более 4 м на уровне прилива (чаще всего, 2-3 м), представляют собой накопления кораллового песка или более грубых обломков на плотном рифовом основании; их часто называют песчаными островами. Как правило, узкие скопления кораллового песка располагаются на отдельных участках рифового кольца, поверхность которого на-

ходится на уровне прилива или немного ниже. Мощность песка обычно составляет от 1 до 3-4 м. Высокие (поднятые) атоллы сложены плотными рифовыми известняками. Поднятая абразионная терраса таких островов отделяется от современной рифовой платформы крутым клифом высотой около 3-4 м. На некоторых островах имеется несколько абразионных террас. Абсолютный возраст коралловых песков и обломков, образующих низкие острова, 1-3 тыс. лет; возраст высоких атоллов значительно больше.

К низким островам относятся многие атоллы Океании, высота которых составляет всего лишь 2-3 м над уровнем прилива; ширина их обычно от нескольких метров до первых сотен метров. Здесь господствующим видом растительности являются кокосовые пальмы, сплошной травяной покров по пологим склонам которых отсутствует. Почва в изобилии покрыта подстилкой из сухих листьев пальмы и гниющих кокосовых орехов. Почвенная масса представлена карбонатным мелкоземом и органическим веществом с включениями обломков плотного известняка и корней растений. Как правило, достаточно четко выражен горизонт A_1 (0-22, 0-60 см), реже A_0 (0-5 см) - дернина, A_1C (30-50 см) - слабогумусированный слой [14]. Основную часть органического вещества почв ($C_{орг}$) составляет нерастворимый остаток; среди растворимой части гумуса фульвокислоты ($C_{ф}$) значительно преобладают на гуминовыми ($C_{г}$) (табл. 1).

Таблица 1. Содержание и состав гумуса, % от всей почвы (горизонт A_1) [14]

Атолл	Глубина, см	$C_{орг}$	$C_{нерастворимого осадка}$	$C_{г}$	$C_{ф}$	$C_{г}$, связанного с		$C_{г}/C_{ф}$
						кальцием	свободный	
Фунафути (малый о-в)	0-10	6,02	5,48	0,12	0,42	0,03	0,09	0,3
Фунафути (главный о-в)	5-15	5,66	4,76	0,15	0,74	0,08	0,08	0,2
Маракеи	5-10	5,79	4,51	0,60	0,67	0,57	0,04	0,9

Коралловые известняки, кроме карбонатов кальция, содержат много магния, а также алюминий, натрий, кремний, серу, фосфор, редкие элементы [14]. Терригенный материал в составе их полностью отсутствует; известняки содержат очень мало железа (табл. 2). Для большинства растений характерна невысокая зольность (1-6% сухого вещества), которая возрастает для мангровых (16-18%). Как правило, в растениях много железа; резкая дефицитность железа в ландшафтах коралловых островов приводит к тому, что оно постоянно удерживается живым веществом, что, судя по всему, очень типично именно для коралловых сообществ.

Несмотря на большое количество осадков поверхностный сток на низких атоллах полностью отсутствует, так как известковый состав и обломочный характер почвообразующих пород создает хорошую водопроницаемость почв [14]. Грунтовые воды таких островов характеризуются специфическим составом (табл. 3), в существенной мере являясь отражением химического состава горных пород (высокие содержания кальция, магния), морской воды (хло-

риды, натрий) и, отчасти, атмосферных осадков (калий). Пресная вода на песчаном атолле залегает неглубоко - от 0,5 до 2,5 м в зависимости от высоты поверхности острова [13].

Таблица 2. Валовый химический состав почв и коралловых известняков низких коралловых атоллов Океании, % на сухую массу [14]

Компонент	Атолл Фунафути		Атолл Маракеи	
	Почва (A1), 0-10 см	Известняк, > 90 см	Почва (A1), 5-10 см	Известняк, поверхность
SiO ₂	0,39	0,31	0,41	0,99
Al ₂ O ₃	1,43	0,59	1,46	1,30
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-
CaO	40,85	47,00	47,64	48,38
MgO	8,75	5,62	-	-
SO ₄	0,41	0,40	0,26	0,41
P ₂ O ₅	не опр.	0,19	не опр.	не опр.
K ₂ O	0,022	не опр.	0,036	0,022
Na ₂ O	0,580	не опр.	0,586	0,920
ППП*	45,64	45,14	45,09	44,42

* Потери при прокаливании.

Таблица 3. Химический состав грунтовых вод коралловых атоллов Океании, мг/л [14]

Компонент	Грунтовые воды		Атмосферные осадки	Средний состав грунтовых вод тропического леса [39]
	Атолл Маракеи	Атолл Бутаритари		
pH	8,2	8,5	4,5-7,2	6,1
HCO ₃ ⁻	202,5	185,4	3,66-9,76	103
SO ₄ ²⁻	4,8	1,2	4,8	3,7
Cl ⁻	213,02	111,6	5,16-82,6	6,0
Ca ²⁺	40,08	36,07	0,5-3,02	16,1
Mg ²⁺	36,48	34,05	0,91-7,9	8,2
Na ⁺	119	65	1-53,5	8,9
K ⁺	11,5	3,0	0,5-4,0	2,7
Сумма	626	436	11-160	170

Рифовые известняки, слагающие высокие острова, обычно интенсивно закарстованы, что обуславливает своеобразное «проваливание» дождевых вод сквозь многочисленные каверны и полости и смешивание их с морской водой. Исследования распределения различных параметров гидрологических и гидрохимических трассеров по скважине глубиной 150 м, пробуренной на одном из коралловых островов Тихого океана, показали, что на определенном уровне в скважине изученные характеристики «рифовых» вод отличаются от состава океанических вод [48]. В частности, идентифицируются два главных источника интерстициальных вод рифа: первый - глубинные (по крайней мере, 350 м) воды Пацифики и второй - поверхностные воды Пацифики от верха и верхнего сектора рифа до его фланга. Глубинные воды океана, как полагают авторы цитируемой статьи, инфильтруются по периферии вулканического сооружения, движутся вверх через базальтовое основание и при подъеме все больше смешиваются внутри карбонатного столба с приповерхностными водами Тихого океана.

Растительность атоллов, как показывают исследования на о. Фаркуар (Сейшельские острова), по сравнению с растительностью гранитных островов в 2-3 раза обеднена железом, никелем, медью, свинцом, хромом, серебром, еще реже марганцем и титаном, но заметно (в 3-4 раза) обогащена стронцием [12, 13]. Отмеченное различие проявляется не только в наземной растительности, но и в манграх, хотя и менее контрастно. Основными источниками поступления многих тяжелых металлов является атмосфера. Так, расчет количества металлов, осаждающихся на поверхность островов восточной части Индийского океана в течение года из атмосферы, показал, что их поступает больше, чем растения могут получить из коралловых известняков (табл. 4). Для многих металлов преобладает поставка в растворимой форме (с дождями); исключение закономерно составляют железо и марганец, для которых характерно существенное поступление в составе сухих осадений (главным образом, очевидно, с золовой пылью). Недавно была установлена определена роль гидротермальных оксигидрооксидов Fe (III) как поглотителей природного мышьяка в экосистеме коралловых рифов [102].

Таблица 4. Поступление тяжелых металлов из атмосферы в экосистемы коралловых островов восточной части Индийского океана, кг/км² [12]

Металл	В растворимой форме с дождями	С сухими осадениями
Железо	3-9	90-108
Марганец	6-18	9-16
Медь	3-9	0,3-0,6
Цинк	7-21	1,4-1,8
Свинец	6-18	0,4-0,7
Никель	1,5-4,5	0,1-0,25

Важную роль в поставке химических веществ, необходимых для нормального развития растительности островов, играют колонии птиц (особенно в поступлении фосфора). Длительное нахождение крупных колоний птиц влечет за собой накопление толщи гуано на поверхности острова, образование атоллового фосфата при переработке залегающего на рифовых известняках гуано и гибель растительности [13]. Как правило, фосфатизованные участки островов содержат значительно больше некоторых металлов (железа, цинка, кадмия), чем «чистые» известняки и атолловые пески. Вымываемые из гуано органические и неорганические кислоты способствуют растворению известняков и карстообразованию. Поскольку процесс трансформации гуано тесно связан с карстообразованием, то залежи атоллового фосфата обычно приурочены к формам карстового рельефа. Залежи фосфатов могут быть очень значительными. Например, на известном о. Науру их запасы оценивались в 90 млн. т, а ежегодная добыча в 1960-70-х гг. достигала 2 млн. т в год. Разработка фосфатов (в значительно меньших масштабах) осуществлялась также и на некоторых других атоллах Индийского океана. По мнению

В.В. Добровольского [13], состояние кораллового рифа как оазиса в океане в значительной мере обусловлено биогеохимическим циклом фосфора.

2. Факторы, негативно влияющие на развитие коралловых рифов

Регенерационная способность коралловых полипов и прочих обитателей рифов необычайно велика, а число врагов сравнительно мало, чтобы нарушить биологическое равновесие и процесс нарастания рифа [19]. Тем не менее коралловый риф как живая система проходит стадии возникновения, развития, расцвета, угасания и гибели. Коралловый биоценоз, достигнув расцвета, может существовать очень долго, пока какие-либо внешние причины не начнут способствовать его угнетению или не приведет к гибели.

2.1. Природные факторы

В природных условиях существует немало различных факторов и явлений, оказывающих негативное воздействие на развитие кораллов и образование коралловых рифов. Среди них - ультрафиолетовое излучение, инфракрасное излучение, тепловой перегрев и связанные с ним явления, такие, как потеря влаги, высыхание, снижение кислорода; чрезмерно активная деятельность сверлящей флоры и фауны и растительноядных животных. Многие моллюски и губки в ходе своей жизнедеятельности выделяют свободные кислоты, которые разрушают коралловый известняк. Карстовые явления могут быть интенсифицированы не только в результате накопления на островах гуано, но и в результате воздействия на известняки морских вод, не насыщенных по отношению к кальциту. Окаймляющие рифы часто гибнут в результате усиления речного стока или перемещения устья реки. При этом на кораллы воздействуют сразу два отрицательных фактора - распреснение воды и вынос ила. Обильные дожди и ливни способствуют резкому уменьшению солености вод, что приводит к гибели коралловых биоценозов, однако при этом не разрушается геологическая структура рифов. Существует точка зрения, что в последние годы многие кораллы гибнут в связи с изменениями течения, например, в акватории Большого Барьерного рифа Австралии. Величина подъема и спада воды при приливно-отливных течениях подчинена строгой закономерности, и кораллы хорошо приспособляются к этим регулярным изменениям уровня океана. Однако изредка наблюдаются необычайно сильные отливы, во время которых морское дно обнажается ниже нормального уровня, что приводит к гибели кораллов.

Смерть кораллового рифа может быть вызвана чисто биологическими причинами. Так, у атлантического побережья тропической Америки иногда наблюдается вспышка массового

развития микроскопически маленьких одноклеточных планктонных водорослей гимнодиниум (*Gummodinium brevis*); они появляются в таком огромном количестве, что изменяется даже цвет морской воды, почему это явление и получило название «красного прилива». Водоросли ядовиты и вызывают массовую гибель множества морских животных. Описан случай сильного разрушения красным приливом участков кораллового рифа в Мексиканском заливе. На коралловые рифы разрушительно действуют землетрясения, извержения вулканов. Кораллы, хотя и достаточно устойчивы к размыву и растворению, тем не менее активно подвержены морской абразии. Скорость образования абразионных ниш в приливно-отливной зоне составляет 1-2 мм/год [34]. При сильных штормах и особенно при ураганах, со скоростью более 300 км/час (в Тихом океане наблюдается до 40 таких штормов ежегодно), волны срезают маленькие острова, сильно размывают и даже уничтожают их, на крупных островах происходят значительные морфологические изменения. Так, в марте 1990 г. тропический циклон, зародившийся над Коралловым морем и получивший название «Ивор», пронесся над Большим Барьерным рифом в 70 км к северу от о. Лизард [121]. Скорость ветра составляла в среднем 110 км/час, а временами превышала 180 км. Метеорологи квалифицировали циклон как небольшой, однако его воздействие на рифы оказалось весьма значительным. Комплексная экспедиция обследовала три рифа незадолго до нашествия циклона и сразу после него, когда были зафиксированы механические разрушения рифов, изменение численности различных видов водной фауны.

Все выше названные факторы и явления, в сущности, являются неотъемлемой частью процесса рифообразования, или, как выразился Ж.-И. Кусто [21], представляют собой «традиционные» виды опасности для коралловых рифов. По имеющимся сведениям, восстановление рифов, разрушенных землетрясениями, происходит за 6-7 лет; рифов, подвергшихся механическим повреждениям, - в течение 10-25 лет; восстановление рифов, пострадавших от тропических ураганов, продолжается десятки лет. Есть сведения, что коралловому рифу необходимо 10-20 лет, чтобы возместить воздействие сильного шторма, а это нередко соответствует периоду повторяемости сильных штормов [34]. Таким образом, особенно сильные ураганы могут прерывать постепенное развитие рифовых образований.

2.2. Влияние морских звезд на коралловые рифы

Кораллы довольно интенсивно могут уничтожаться некоторыми организмами: рыбами, морскими сверлильщиками, губками, морскими ежами, но особенно морскими звездами. Известно, что некоторые морские звезды живут за счет мадрепоровых кораллов. Среди них особую роль играет красновато-коричневая причудливой формы морская звезда терновый венец -

Acanthaster planci (акантастер), который имеет округлое тело, причем вся поверхность его усеяна иглами, покрытыми ядовитой слизью. Акантастер - одна из самых крупных морских звезд, в диаметре он достигает 30-35 см, хотя изредка встречаются и более крупные полуметровые экземпляры. Терновый венец размножается один раз в год (в районе Большого барьерного рифа в декабре - январе), причем одна самка выметывает в воду 12-24 млн. мельчайших икринок [27]. Микроскопически маленькие личинки первое время держатся в планктоне, и их частично выедают различные планктонные хищники. Едва осев на дно и превратившись в маленькую звезду, акантастер становится ядовитым, и потому у него почти нет врагов. Достоверно известно, что этих звезд могут поедать крупные брюхоногие моллюски тритоны (*Charonia tritonis*).

Акантастеры ползают среди рифов, оставляя позади себя белую полосу известковых скелетов кораллов с начисто объединенными мягкими частями. Звезды выделяют желудочный сок и за несколько часов полностью растворяют известковый панцирь, добираясь до живых кораллов. Звезда выворачивает через рот свой желудок как перчатку, обволакивает им часть колонии и, медленно передвигаясь по ней, поедает полипы, от которых остаются только белые известковые скелеты. За сутки одна звезда истребляет кораллы площадью 1 м². Кроме того, имеют место ядовитые выделения, что может приводить к отравлению полипов. Отравляющее действие, видимо, вызывается оранжевым и красным пигментом кожи, покрывающей иглы звезды, но возможно, что ядовиты также и ее педицеллярии [15, 19, 31]. Как правило, без вреда для рифа на одном гектаре может прокормиться около 65 терновых венцов средней величины. Когда их число увеличивается, рифу грозит серьезный урон и даже гибель. На рифе, подвергнувшись массовому нашествию терновых венцов, звезды движутся сплошным фронтом со средней скоростью около 35 м в сутки, уничтожая до 95% кораллов [27]. Количество звезд при их массовом размножении достигает астрономической величины. Так, при контрольных подсчетах, проводившихся на Гавайских островах, один аквалангист за час насчитывал от 2750 до 3450 терновых венцов, т. е. каждую секунду регистрировал наличие очередной звезды.

Если раньше звезды встречались в небольшом количестве и не представляли серьезной угрозы для существования рифов, то с начала 1960-х гг. во многих местах (особенно в Тихом океане) численность их настолько резко возросла, что они за несколько лет уничтожили целые участки рифов [19, 81]. Особенно пострадал Большой Барьерный риф, кораллы Маршалловых островов и Гавайских островов, Гуама и ряда других рифов. Например, в районе острова Гуам звездами уничтожено около 40 км² кораллов, в районе Большого барьерного рифа - более 250 км². К концу 1960-х - началу 1970-х годов бедствие приняло настолько значительные масштабы, что правительствами Австралии, Англии, Японии и США было организовано несколько

экспедиций специально для изучения проблемы тернового венца и разработки мер борьбы с ним. Только в 1972 г. было обследовано 83 рифа Тихого океана, причем общая сумма затрат достигла миллиона фунтов стерлингов [27].

В первой половине 1990-х гг. от нашествия морских звезд пострадали коралловые рифы Фиджи, Тонга, Зап. Самоа [125]. Наиболее опасная ситуация сложилась на островах Рота и Сайпан в Марианском архипелаге и Палау, Трук в Каролинской группе островов. В 1969 г. на острове Джонстон и на атоллах Капингамаранги, Нукуоро и Пигелан в Каролинском архипелаге специалисты за каждые 20 мин пребывания под водой фиксировали более 20 особей тернового венца, что считается пределом нормы [31]. Есть сведения, что особенно значительно количество терновых венцов возросло в австралийских водах близ Квинсленда, причем они уже к началу 1980-х гг. уничтожили пятую часть кораллов Большого Барьерного рифа [4]. Тем не менее исследования на Большом Барьерном рифе позволяют надеяться, что погибшие в результате массового нападения морских звезд участки рифа не разрушатся, а постепенно вновь заселятся кораллами и риф возродится [19].

Причина столь массового размножения до конца еще не выявлена. Несомненно, что во многих случаях толчком для этого послужило техногенное загрязнение океана. По наблюдениям Д.В. Наумова [27], на островах Новые Гибриды и Фиджи достоверно установлено, что звезды в первую очередь нападают на те рифы, которые ослаблены загрязнением. Звезды скапливаются в массовом количестве именно на таких загрязненных участках и доканчивают разрушение, начатое человеком. В любом случае создается впечатление, что эта звезда встречается там, где наиболее активен человек. Например, на островах Микронезии и Большого Барьерного рифа аборигены через чур интенсивно отлавливают крупных тритоний и конусов для продажи их раковин туристам, а эти моллюски являются естественными врагами морских звезд [21]. Сбросы сточных вод обуславливают евтрофирование и загрязнение вод, что нарушает природное равновесие и приводит к развитию морских звезд. Высказывается также предположение, что их размножению способствует повышение радиационного фона. Дело в том, что такое техногенное воздействие приводит к гибели той разновидности планктона, которая контролирует численность морских звезд, паразитируя на личинках в период размножения. Кроме того, при различных строительных работах и добыче строительных материалов коралловые образования взрывают и скребют драгами, что приводит к уничтожению многих морских организмов, питающихся личинками морской звезды. Не исключено, что вспышка численности тернового венца является результатом естественных колебаний численности популяций. Согласно [116], вспышки численности морской звезды в 1962-1977 и 1979-1986 гг. в районе Большого Барьерного рифа обусловлены влиянием человека. Авторами были проанализированы пробы поверхностных отложений с рифов Джон Брюэр, Грин-Айленд и о. Херон,

а также колонки грунта, взятые вблизи первых двух рифов. В пробах обнаружены характерные скелетные элементы звезд в количестве (в поверхностных отложениях) до 11,2-21,7 элементов на 1 кг грунта. Количество скелетных элементов в колонках сравнимо с их количеством в поверхностных отложениях осадке. Детальная стратиграфическая интерпретация в существенной мере затруднялась биогенным рециклингом отложений, в особенности в результате деятельности декапод *Callianassidae*. Однако было установлено, что некоторые интервалы продолжительностью 1-2 тыс. лет были более обогащены остатками звезд, чем другие. Присутствие звезд на Большом Барьерном рифе впервые отмечено для слоев возрастом примерно 8000 лет и, очевидно, характерно для всего голоцена. Возможно, что вспышка численности звезды могла серьезно влиять на рост кораллов в начале голоцена, 7-9 тыс. лет назад, когда уровень океана повышался на 9 мм/год. Очевидно, что влияние звезд существенно сказывалось на формирование основы рифов Большого Барьерного рифа в течение послеледникового времени и оказывало влияние на становление видового богатства фауны, так как периодические нарушения равновесия экосистемы способствуют возрастанию и поддержанию высокого видового богатства.

Существует также точка зрения, что массовое появление акантастеров, имевшее место в 1960-х гг., зависело не только от загрязнения среды, но и объясняется также естественным пиком размножения этого вида, который происходил на фоне благоприятных условий, вызванных загрязнением.

Не один только терновый венец пожирает мягкие ткани рифообразующих кораллов, их полипами питаются также другие крупные звезды, однако они никогда не размножаются в столь большом количестве. Массовое размножение крупной морской звезды - протореастера в бухте у Порт-Морсби, очевидно, связано с загрязнением акватории отходами большого города, дающими звездам обильную пищу [27].

2.3. Влияние деятельности человека

В последние десятилетия в естественное развитие коралловых рифов активно вмешивается новый фактор - непосредственная хозяйственная деятельность человека и связанные с ней негативные явления локального и глобального характера. Коралловые рифы многих районов мира страдают от любительского судоходства, неорганизованного туризма, перелова рыбы, браконьерства, строительных работ и добычи полезных ископаемых на побережье и шельфе. Большой ущерб атоллам наносят кокосовые плантации и посадки строительного леса; выращивание тропических фруктов на экспорт, а сброс отходов и сточных вод в прибрежные районы, с морских судов и т. д., что обуславливает химическое загрязнение и евтрофиро-

вание акваторий. Антропогенное воздействие сопровождается изменением существующих в океане пищевых цепей, что приводит к росту численности естественных врагов коралловых полипов. К числу глобальных факторов, оказывающих негативное влияние практически на все коралловые экосистемы мира относятся такие, как глобальное потепление и кислотные дожди. В настоящее время техногенное воздействие на коралловые рифы приобрело глобальный характер и проявляется практически во всех районах их распространения.

Так, в водах Флориды (США) коралловые рифы страдают от повреждения их якорями судов, а также при авариях судов, которые приходится стаскивать с рифов [103]. Землечерпательные работы у берегов Флориды обусловили достаточно интенсивное загрязнение вод, что привело к гибели кораллового рифа и всех его обитателей на площади 162 км² [114]. Антропогенному воздействию подвергаются коралловые рифы, прослеживающиеся вдоль Карибского берега Коста-Рики [71]. Вырубка лесов в прибрежных районах и деградация болот на побережье этой страны ведут к активизации эрозии, поступлению в море большого количества наносов, снижению защищенности берегов и, как следствие, разрушению их штормовыми волнами. Определенную роль играет поступление в море химикатов, применяемых на банановых плантациях Рио-Эстрелла.

В Шри Ланка коралловые биоценозы, распространенные поблизости от берега, страдают от добытчиков извести, поставляющих ее на промышленную переработку, от многочисленных туристов, якорных стоянок прогулочных судов, выбросов с судов отработанных машинных масел, заиления в местах впадения рек, тралового промысла рыбы, а также от нашествия поедающих кораллы морских звезд [104].

Техногенные угрозы коралловым рифам Индонезии, одним из самых богатейших и самых разнообразных в мире, авторы статьи [63] разделяют на 2 типа: острые угрозы и хронические стрессы. Первые порождают серьезный ущерб в короткий промежуток времени; к их числу можно отнести разрушительные способы рыбной ловли (например, с использованием динамита), а также другие формы механического ущерба. Но ввиду того, что эти угрозы не носят стойкого характера, рифы могут восстанавливаться. Хронические стрессы причиняют долгосрочный ущерб рифам. Примерами таких стрессов в Индонезии являются загрязнение сточными водами и поверхностным стоком с сельскохозяйственных территорий, заиление, прибрежное евтрофирование и промышленное загрязнение. Рифы не могут восстановиться от хронических стрессов до тех пор, пока не ликвидирован источник стресса.

В Папуа-Новая Гвинея коралловые рифы занимают 40 тыс. км² (до глубины 30 м) и находятся в лучшем состоянии, чем у берегов соседних Филиппин и Индонезии [77]. Однако с ростом прибрежного населения угрозы для них постоянно возрастают. Прибрежные мангры вырубаются на дрова и строительный материал, что усиливает береговую эрозию и заиление рифов. В

море вывозятся хвосты от обогащения медной руды и другие отходы горных работ. Неочищенные стоки прибрежных городов и поселков насыщают морскую воду питательными веществами и патогенами, из-за чего периодически закрываются пляжи и банки, на которых добывают омаров. Лов рыбы в прибрежных водах относительно невелик из-за удаленности рынков, но там, где есть сбыт, наблюдается перепромысел. Рыбу глушат взрывчаткой, похищаемой из шахт, а также из «забытых» арсеналов времен 2-й Мировой войны. Усиление заиления морских вод ожидается в случае расширения заготовок леса по морским и речным берегам и создания плантаций (экспортных) культур, поощряемых государством. Плохая охрана рифов, по мнению автора цитируемой статьи, объясняется отсутствием должного экологического надзора и нежеланием властей его создавать.

На Западно-Каролинских островах (Федеративные штаты Микронезии) расчистка лесов на побережье приводит к усилению эрозии и замутнению ближайших морских вод [68]. В гавань у г. Колония выпускаются неочищенные стоки. Хотя рыбу не глушат (как на Филиппинах), и кораллы не ломают на известь, однако активно идет добыча кораллового песка. На побережье увеличивается плотность населения, строятся поселки и туристские отели.

Быстрый рост населения на островах Фиджи, Тонга и Зап. Самоа приводит к перелову рыбы и крупных моллюсков в районах, прилегающих к городским центрам [125]. Там же наблюдается интенсивное загрязнение морской среды неочищенными стоками и фильтратом от городских свалок, что приводит к евтрофированию морских вод, периодическому цветению воды. При расчистках береговых лесов усиливается эрозия почв, и кораллы страдают от заиления. Обламывание кораллов туристами на сувениры иногда приводит к их заболеваниям. Страдают кораллы и от нашествия морских звезд. Местные власти в основном озабочены экономическим развитием и слабо увязывают его с охраной окружающей среды. По рекомендациям австралийских специалистов, Тонга имеет морские резерваты, создание которых является результатом убеждения групп местных рыбаков, среди которых неформально разделены рыбные угодья.

В американском Самоа коралловый риф в бухте Паго-Паго впервые был обследован еще в 1917-1920 гг. Для выяснения последующего влияния среды и деятельности человека на эту экосистему спустя более 50 лет было проведено ее повторное исследование [58]. Установлено, что некоторые участки рифа практически полностью разрушены, другие - повреждены; уменьшилось общее количество кораллов, изменилось соотношение некоторых родов и снизился средний размер колоний за счет доминирования молодых кораллов. В гавани Паго-Паго отмечены еще более серьезные изменения кораллового рифа, которые обусловлены как естественными, так и техногенными процессами; особенно большое значение имели усиленное

осадконакопление (сведение лесов и освоение побережья) и интенсивное евтрофирование (сбросы стоков).

Во Французской Полинезии около 130 островов (5 архипелагов), в т. ч. 84 атолла, занимают (вместе с акваториями) 2,5 млн. км² [80]. Быстро растущее население достигло 200 тыс. чел., местами наблюдается перелов морской рыбы и моллюсков, оскудение жемчужных банок. На дне некоторых лагун добывают песок и гравий. Кораллы здесь страдают также от поступающих неочищенных сточных вод (в т. ч. от многочисленных свинарников) и от заиливания вод, вызываемого сведением прибрежных лесов. Сбрасываемые сточные воды способствуют размножению водорослей и - косвенно - морских ежей.

Серьезную угрозу коралловым рифам представляет загрязнение мирового океана нефтью и нефтепродуктами, которое уже сказывается на самых отдаленных островах [19]. Отрицательное воздействие нефтяных супертанкеров на кораллы Красного моря наблюдали Ж.-И. Кусто и его коллеги еще в 1960-70-х гг., отметившие в районе о. Мар-Мар обширные участки мертвых кораллов. На коралловые биоценозы негативное влияние оказывали также моющие средства, пестициды, выбросы нечистот с пассажирских кораблей. Ряд островов архипелага Фарасан представляли собой «мусорную яму», их берега были покрыты мазутом, кораллы омывались мутными водами и затягивались зеленой слизью [21].

Нефтяное загрязнение после известных военных действий в Персидском заливе обусловило изменение состояния популяций кораллов, наиболее массовых видов водорослей, первичных продуцентов, а также мангровых зарослей в прибрежной зоне [111]. Интересно отметить, что загрязнение Красного моря нефтью привело к массовой гибели мадрепоровых кораллов, тогда как черные кораллы (горгонарии) адаптировались к этим условиям и относительно нормально живут в измененной среде [45].

Лабораторные исследования показывают, что дисперсанты и диспергированная сырая нефть оказывают негативное воздействие на личинки кораллов Красного моря [64]. Так, например, воздействие растворимых в воде фракций сырой нефти на личинки кораллов *Stylophora pistillata* и *Heteroxenia fuscescense* в условиях острого токсикологического теста ингибировало только их прикрепление к стенкам сосуда. Нефтяные дисперсанты Inipol IP90, Petrotech PTI-25, Bioreico R-93, Biosolve, Emulgal C-100, а также диспергированная нефть подавляли прикрепление личинок и одновременно оказывали выраженное токсическое действие. Последнее проявлялось в утрате личинками нормальной подвижности, изменении формы и положения тела и быстром разложении тканей, приводившем к гибели планул. Морфологические изменения были выражены в форме поперечной перетяжки тела планул и других деформаций. Наименее токсичными из использовавшихся дисперсантов оказался Petrotech PTI-25. Авторы считают, что при утечках нефти вблизи коралловых поселений следует воздерживать-

ся от использования дисперсантов и применять другие способы очистки морской среды от нефтяного загрязнения.

С начала 1950-х до конца 1980-х гг. в производстве сахарного тростника в бассейнах рек Герберт и Бурдекин (Северный Квинсленд, Австралии) широко использовались хлорорганические пестициды (ХОП), которые в составе речных наносов поступали в лагуну Большого Барьерного рифа [54]. На прибрежной аллювиальной равнине проведены исследования монолитов донных отложений и поверхностных осадков, а также образцов почв под сахарным тростником. В образцах морских поверхностных отложений и 3 монолитов концентрации ХОП были менее 5 нг/г, тогда как в образцах почв они составили 0,01-45 нг/г, что указывает на потенциальную возможность их поступления в реки в результате развитой здесь эрозии почв и выноса в море. Действительно, исследования, выполненные в 1997-98 гг. во многих пунктах вдоль побережья Квинсленда и Большого Барьерного рифа, выявили присутствие в донном грунте и водорослях широкой группы ХОП, применяемых в прибрежных районах Северного Квинсленда, особенно для обработки плантаций сахарного тростника. В частности, концентрации атразина составили 0,1-0,3 мкг/кг, диурона 0,2-10,1, линдана 0,08-0,19, дильдрин 0,05-0,37, ДДТ 0,005-0,26 и ДДЕ 0,05-0,26 мкг/кг [73]. Самый высокий уровень загрязнения ХОП зарегистрирован на участках выпадения сильных тропических дождей.

В работе [67] представлены результаты исследований загрязнения органическими веществами системы кораллового рифа, расположенного вдоль побережья северной Флориды. Прежде всего, проводилось сравнение данных о загрязнении хлорорганическими пестицидами биоты рифа и специально подготовленных проб пятью лабораториями. Затем химический анализ рыб, лангустов и гироид, обитающих в кораллах, проводился в одной из выбранных лабораторий. Хлорорганические пестициды были обнаружены в 43 из 52 проб, причем содержание различных пестицидов в большинстве исследованных организмов составляло менее 1 мкг/кг сырой массы. Наибольшие уровни отмечены для линдана в лангустах - 2,3 мкг/кг. Показательно, что практически во всех пробах были обнаружены незначительные количества полихлорированных бифенилов. Авторы статьи полагают, что в настоящее время интенсивность техногенного загрязнения морской среды в данном районе пока не представляет серьезной угрозы для коралловых биоценозов. В частности, по их мнению, куда более существенным оказалось воздействие урагана, прошедшего над Флоридой.

Нередко в загрязненных местах наблюдается рост устойчивых к загрязнению водорослей, которые заглушают кораллы. Это, например, было отмечено на Гавайских островах, где появились заросли водорослей *Dictyosphaeria* [81]. В последние годы в некоторых районах Мирового океана отмечается массовая гибель морских ежей (впервые - в прибрежных водах Североамериканского континента к северу от Багамских островов), что, возможно, может

быть связано с загрязнением морской среды. Уменьшение численности морских ежей, питающихся водорослями, приведет к избыточному размножению последних, что также нарушает условия жизнеобитания кораллов.

Атолл Бикини (Маршалловы о-ва, Микронезия) в 1946 г. США избрали местом проведения серии испытания атомных взрывов. Радиоактивные выбросы (радиоидод-131) достигли атолла Ронгелап, расположенного в 125 км от Бикини, что привело к возникновению у людей, проживающих здесь, опухоли щитовидной железы. Как подчеркивал в начале 1980-х гг. М. Стингл [32, 33], «атомный огонь» до сих пор сжигает жителей Микронезии - обитателей Ронгелапа и Утирика, Эниветока и Бикини. Аналогичные испытания проводились Францией в юго-восточной части архипелага Туамоту (на атолле Моруроа), последствия которых нашли отражение в заголовках газет тех времен: «Океан вокруг Моруроа отравлен», «Моруроа - дырявый тонущий атолл», «Моруа - величайший раковый очаг на Земле» [8]. На атолле Джонстон (Гавайи), расположенном в 1330 км к юго-западу от Гонолулу, в конце 1950-х - начале 1960-х гг. происходили запуски ракет с ядерным оружием, три из которых были аварийными, но без ядерных взрывов [122]. Установлено, что более 99% общего содержания актинидов в образце из почвы связано с отдельными фрагментами бомб. Эти фрагменты представлены 9 «горячими частичками» массой от 2000 до 0,2 мГ; они содержат 0,2-2 вес. % ^{239}Pu . После удаления этих фрагментов в почве установлена обратная связь между содержаниями актинидов и размером почвенных частиц (для интервала частиц от 43 до 0,4 мкм в диаметре). Детальный анализ не выявил в оставшейся почве других дискретных актинидсодержащих фаз; распределение оставшихся актинидов по размерам частиц почвы было равномерным. Предполагается, что в условиях выветривания происходит преобразование относительно нерастворимых оксидов актинидов в обломках в более растворимые актинилкарбонатные комплексы с последующей их миграцией в поверхностный слой почвы. Эти растворы близки к истинным и поэтому равномерно распределялись в пределах почвенного слоя. Сорбция актинидов на почвенных частицах не зависела от размеров последних, что и определило равномерное распределение активности по фракциям почвы. В процессе растворения, переноса и сорбции актинидов не происходит заметного фракционирования элементов: отношение Pu/Am в «горячих частичках» и почвах примерно одинаковое. Результаты ядерного взрыва имеют для коралловых биоценозов чрезвычайно далеко идущие последствия. Американский ученый Р. Иоганнес (R. Johannes, 1970, цит. по [27]), обследовавший атолл Эниветок через 13 лет после взрыва атомной бомбы, нашел на рифе лишь маленькие колонии четырех самых обычных видов кораллов. Ни ураганы, ни землетрясения, ни терновый венец не оставляют после себя такие глубокие и такие стойкие поражения подводных коралловых садов.

Кораллы, обладающие массивным известковым скелетом, с давних пор служат аборигенам единственным источником извести для строительных и бытовых нужд. Известь, получаемая при обжиге известняка кораллового происхождения, отличается высоким качеством, так как почти не содержит примесей. Ее применяют для кладки стен (вместо цемента), в штукатурных работах и для побелки помещений. Для сооружения причалов, молов, набережных используются грубо обработанные блоки, которые высекаются из крупных шариковидных колоний полипов. Для строительства наземных сооружений (дома, ВПП аэродромов, надгробия, кресты и пр.) широко применяют известняк, образовавшийся из отмерших кораллов. Вяжущий раствор получают путем гашения предварительно обожженной коралловой извести. Интересно отметить, что в Юго-Восточной Азии и на некоторых островах Океании распространено жевание бетеля, в состав которого непременно входит коралловая известь [43].

Обычно известняк добывают на внешнем рифе, где создаются своеобразные каменоломни, что сопровождается разрушением природного барьера, защищающего рифы от океана. По словам Ж. Кусто [21], здесь располагаются «вырождающиеся кораллы, кладбища кораллов». Широкое использование коралловых рифов как источников строительного материала на Мальдивских островах приводит к их разрушению и изменению экосистем всей прибрежной зоны [55]. Коралловые рифы Шри Ланки серьезно страдают от добытчиков извести, поставляющих ее на промышленную переработку [104]. Первостепенной мерой авторы цитируемой работы считают перемещение ломщиков кораллов на месторождения известняков вглубь острова. На Западно-Каролинских островах (Федеративные штаты Микронезии) довольно широко распространена добыча кораллового песка, что также негативно сказывается на состоянии коралловых рифов [68]. Песок и гравий добывают также на дне некоторых лагун Французской Полинезии [80].

Использование кораллов для строительства иногда приводит к совершенно неожиданным эффектам. Так, еще сто лет назад суданский город Суакин называли Венецией Красного моря. В течение пяти веков это был крупный порт. Ныне же здесь никто не живет, а корабли не могут войти в гавань. От сотен дворцов и домов остались лишь руины. Дело в том, что приблизительно в 1860 г. здесь начали строить здания из кораллов, известковые скелеты которых (в виде блоков) доставляли из разных районов Красного моря и сгружали в бухте Суакин. Необработанные блоки использовали сразу после извлечения из воды, без каких либо мер защиты. На берегу они стали крошиться, а полипы в бухте стали размножаться с необыкновенной скоростью. В результате в море вырос барьер, препятствующий заходу судов в порт.

Имеющиеся немногочисленные сведения показывают, что скорость восстановления коралловых рифов, пострадавших от техногенных факторов, в частности, от загрязнения про-

мышленными стоками, несравнимо ниже скорости регенерации рифов в естественных условиях.

2.4. Выцветание кораллов

В 1982-1983 гг. после крупномасштабных изменений в атмосфере и океанической среде, называемых Эль-Ниньо - Южное колебание, кораллы на некоторых участках архипелага Флорида-Кис побелели и погибли, а у берегов Панамы их отмирание составило 50% [3]. Кораллы и губки, обычно золотисто-бурые, зеленые, розовые и серые, стали абсолютно белыми. В других местах бледные кораллы встречались на поверхности рифа попеременно с невыцветшими колониями того же вида. Во время Эль-Ниньо 1982-1983 гг. кораллы выцвели и во многих других районах Индо-Тихоокеанского региона, включая острова Сообщества, Большого Барьерного рифа, западную часть Индийского океана и Индонезию. Установлены широкомасштабные выцветания и гибель до 80-90% колоний на мелководных рифах архипелага Тысяча островов и в Яванском море. Наиболее пострадали кораллы на ближайших к поверхности вершинах рифовых построек. Массовое побеление кораллов наблюдалось в Тихом океане и Карибском море еще в 1980 г., но тогда большая часть кораллов за зиму восстановилась [91]. В 1987-1988 гг. такие явления повторились, в частности, на Виргинских островах. Летом и осенью 1990 г. после нескольких недель ненормально жаркой погоды было отмечено обширное побеление кораллов на рифах Пуэрто-Рико, в меньшей степени - у южной Флориды, в Карибском море, у Окинавы и Гавайских о-вов [91]. Уже тогда данная проблема обсуждалась в Сенате США (в Комитете по торговле, науке и транспорту). К концу ноября флоридские рифы уже восстановились, но карибские оставались еще белыми. К концу 1990-х гг. интенсивность побеления кораллов в некоторых регионах достигла беспрецедентных размеров [94]. С марта 1991 г. отмечалось побеление кораллов на рифах Таити и Муреа, в частности, у Бора-Бора [108]. В настоящее время практически везде кораллы страдают от выцветания, после которого многие из них так и не оправляются. Так, даже спустя пять лет покрываемая пострадавшими полипами площадь уменьшилась только на половину прежней величины.

Точные причины выцветания кораллов не известны. Связь выцветания кораллов с Эль-Ниньо, т. е. с повышением температуры морской воды в экваториальной зоне на 2-3°C по сравнению с нормой, привела некоторых ученых к предположению о том, что это один из симптомов глобального потепления климата. В принципе выцветание кораллов может вызываться многими факторами, включая болезни, избыточное затенение, загрязнение и изменение солености воды, влияние деятельности морских звезд, тропических ураганов и др. [3, 94]. Тем не менее результаты большинства наблюдений четко связывают это явление с необычайно

высокой температурой воды [3]. Многие исследователи считают, что понимание этого сложного явления поможет точно определить и, возможно, устранить угрозу существованию коралловых рифов.

Хорошо известно, что многообразие яркой окраски кораллов обусловлено их симбионтами, т. е. организмами, которые связаны с кораллами взаимовыгодными отношениями. Речь идет о симбиодиниумах (зооксантеллах), которые, как отмечалось выше, обитают обычно в прозрачных стенках полипов. На 1 см² ткани коралла приходится от 1 до 2 млн. их клеток [3]. В процессе фотосинтеза эти водоросли образуют органические соединения, частично используемые кораллом. Фотосинтез ускоряет также формирование кораллового скелета, стимулируя отложение карбоната кальция. Полипы в свою очередь обеспечивают зооксантелл некоторыми необходимыми для роста питательными элементами, в частности азотом и фосфором, а также служат для них субстратом. При выцветании кораллов это хрупкое равновесие между жизнедеятельностью симбионтов нарушается. Полипы теряют зооксантеллы, а их ткани становятся настолько бесцветными, что заметен только белый известковый скелет [94]. Другие организмы, содержащиеся в своих клетках водоросли, например актинии, роговые кораллы и губки, также могут белеть аналогичным образом. В какой-то мере этот процесс естественен: здоровые коралловые полипы или актинии теряют водоросли непрерывно, но в очень малых количествах. В природных условиях в процессах регуляции и обновления их состава из коралла удаляется менее 0,1% одноклеточных симбионтов. При неблагоприятных условиях окружающей среды, например, при повышении температуры, потери возрастают. Механизм удаления зооксантелл не вполне ясен. Как отмечают Б. Браун и Дж. Огден [3], даже определение термина «выцветание» вызывает трудности. В настоящее время исходят из измеренных в лабораторных условиях потерь водорослей и снижения содержания в коралле их пигментов. В природных условиях обесцвечивание обычно оценивают невооруженным глазом.

К настоящему времени предложено несколько механизмов процесса выцветания (побеления) кораллов. В 1928 г. М. Янг и А. Николлз стали одними из первых, кто описал это явление на Большом барьерном рифе [3]. Они предположили, что водоросли мигрируют сквозь ткани кораллов в ответ на стрессорные факторы среды, в результате попадают в пищеварительную полость своих хозяев и в конечном итоге выталкиваются наружу через ротовое отверстие. Что именно вызывает их выход и какой стимул вообще заставляет их двигаться, тогда было неизвестно и до сих пор мало понятно. По некоторым представлениям, в условиях стресса коралловые полипы обеспечивают водоросли меньшим количеством биогенов. Водоросли не обязательно страдают непосредственно от высокой температуры, однако она снижает интенсивность метаболизма их хозяев. Снабжение зооксантелл углекислым газом, азотом и фосфором становится недостаточным, и это заставляет их сниматься с места.

Известна гипотеза о потере кораллами в условиях стресса не только зооксантелл, но и собственных клеток [3]. В частности, какой-либо стресс приводит к истончению тканей хозяина, что, возможно существенно сокращает доступное их симбионтам пространство. Так, в 1991 г. на разных островах смертность кораллов на глубинах до 10-15 м (полное побеление, начало роста эпифитных водорослей считали признаками гибели) достигла 10-15% [92]. Установлено, что побеление проявилось в изменении окраски за счет снижения численности и/или выноса зооксантелл.

Согласно другой гипотезе, водоросли в неблагоприятных условиях выделяют ядовитые вещества, наносящие вред хозяину. Они образуют кислородсодержащие соединения - перекисные радикалы - в концентрациях, которые угрожают жизнедеятельности кораллов. Такие вещества обезвреживаются ферментом хозяина - супероксиддисмутазой. Однако, как считают М. Лессер и его коллеги из университета шт. Мэн (США), в некоторых случаях токсической воздействие указанных радикалов может приводить к выцветанию. Хотя авторам и не удалось измерить содержание этих радикалов непосредственно, было прослежено образование супероксиддисмутазы и установлено, что повышение температуры и усиление ультрафиолетового излучения независимо друг от друга стимулируют ферментативную активность. Авторы пришли к выводу, что токсичные вещества способны вызывать выцветание кораллов вследствие переноса радикалов из поврежденных водорослей в ткани животного-хозяина [3]. Не исключены и другие биохимические изменения. Так, существует предположение, что в ответ на стресс происходит перестройка геной экспрессии. Возможно, она обуславливает синтез так называемых «белков теплового шока» - соединений, обнаруженных во всех организмах в условиях перегрева и служащих для временной защиты от него. Как установил Д. Миллер из Линдского университета, содержание этих белков возрастает в актиниях, испытывающих тепловой шок [3]. Кроме того, у актиний, которые выдерживают повышение температуры, присутствие белков коррелирует с ослаблением выцветания в это время .

Важную роль при выцветании играет также генетическая неоднородность. Судя по всему, факторы окружающей среды влияют на разные виды водорослей и кораллов неодинаково. Разные кораллы служат хозяевами для различных штаммов водорослей. Зооксантеллы одного вида коралла сходны генетически по составу, но отличаются от населяющих кораллы других видов. Некоторые водоросли, возможно, особенно чувствительны к температуре и характеризуются изменчивой теплостойкостью. Согласно альтернативной точке зрения, важна изменчивость не водорослей, а самих кораллов. Установлено также , что в некоторых случаях выцветание кораллов является следствием их адаптивной поведенческой реакции. Так, в 1989 г., работая в Морском биологическом центре Пхукета (Таиланд), Б. Браун наблюдала, как некоторые виды литоральных кораллов становятся совершенно белыми в периоды сизигийных отли-

вов [3]. Выяснилось, что кораллы способны втягивать свои поверхностные ткани в скелет, составляя его открытым, но водорослей при этом не теряют. Такую реакцию предложено называть «адаптивным побелением», которое, по-видимому, снижает высыхание организма во время его пребывания на воздухе.

Тем не менее причиной выцветания карибских кораллов в 1980-х гг. многие исследователи считают именно повышение температуры. Как отмечалось, в зависимости от географического положения коралловые рифы обычно развиваются при 25-29°C. Этот узкий температурный диапазон для кораллов очень близок к их верхней летальной температуре: нагревание воды на 1°C выше обычного летнего максимума может привести к их гибели [3]. Действительно, в течение 10 месяцев 1982-1983 гг. необычно мощные эпизоды Эль-Ниньо неоднократно нагревали воды восточной части Тихого океана на 3-4°C выше средней температуры. Вблизи побережья Панамы и Коста-Рики от 70 до 90% колоний полипов погибли через несколько недель после обесцвечивания; вымерло и более 95% галапагосских кораллов. Следует отметить, что свидетельства нагревания Карибского моря в 1987 г. не так убедительны. В частности, температура воды оставалась существенно ниже уровня 32°C, при котором кораллы выцветали в лабораторных условиях (среднемесячные значения ее в этом регионе были 30,2°C). Тем не менее есть сведения, что в 1991 г., когда также наблюдалось выцветание кораллов, температура местами достигала 31°C. По некоторым сведениям, побеление кораллов наступает при повышении летней температуры воды на 2-3°C более, чем в течение нескольких суток [91, 94]. В данном случае в качестве механизма реакции побеления рассматриваются такие явления, как быстрый расход энергетических резервов полипов, формирование токсичных оксидов; предполагается также связь побеления кораллов с явлением Эль-Ниньо и с парниковым эффектом.

В 1991 г. в Майами состоялась конференция по проблемам выцветания рифов, на которой специалисты пришли к выводу, что побеление кораллов связано с локальными повышениями температур, однако недостаток данных не позволяет связывать это явление с глобальным потеплением климата. П. Джонкил и С. Коулз из Гавайского ун-та показали, что выцветание и гибель кораллов вызываются не резким тепловым шоком, а длительным преобладанием повышенных температур и значительным их отклонением от нормы в обе стороны [3].

Геохимическими методами изучено влияние климата на топографию колоний кораллов сем. *Porites sp.* в центральных и окраинных частях рифа Австралии [57]. По изотопному составу кислорода ^{18}O и углерода ^{13}C установлено циклическое строение карбонатного скелета кораллов, зависящее от сезонных климатических изменений в период 1983-1988 гг. Неравномерность роста скелета кораллов проявляется уже при изменении температуры окружающей океанической воды даже на 1°C. Кроме того, отмечается и неравномерность и внутрискелет-

ного роста. Так, во впадинах структуры рост составляет 9,2 мм/год, а в выпуклых частях - до 10 мм/год.

Австралийский институт по изучению моря опубликовал результаты исследований, проведенных у побережья Австралии (Известия, 13 сентября 2003 г.). В Коралловом море и южнее повышение температуры в океане даже на 1°C способно вызвать необратимые изменения в сообществах Большого Барьерного рифа. Уже сегодня цветные кораллы, формируемые в результате деятельности коралловых полипов и сопутствующих им организмов, способных извлекать из морской воды известняк, буквально на глазах меняют цвет и становятся белыми, или, как иногда говорят ученые, кораллы линяют. Есть прогнозы, что кораллы в этих районах могут погибнуть уже к середине нынешнего века.

В любом случае ученые единодушны в том, что независимо от причин, побеление кораллов представляет собой чрезвычайно серьезную проблему. Действительно, широкие масштабы гибели кораллов в восточной части Тихого океана во время Эль-Ниньо 1982-1983 гг. имели тяжелые биологические последствия [3]. В частности, обширные постройки рода *Pocillopora* служат для более массивных видов кораллов защитой от морской звезды, однако при потеплении воды смертность поциллопоры возрастает, плодовитость ее падает и крупные кораллы оказываются беззащитными перед врагом. Страдают и хищные ракообразные, питающиеся богатой липидами слизью, которую выделяет поциллопора. Массовая гибель полипов, образующих рифовые постройки Панамы и Галапагоских островов, в 1982-1983 гг. привела также к сокращению ареала одного из видов коралла рода *Millepora* и вывала вымирание другого вида того же рода. Видимо, эти животные пострадали сильнее всего в связи с их ограниченным распространением и крайней чувствительностью к повышению температуры. Экологическое нарушение вызвало здесь также полное прекращение долговременного накопления на рифах карбоната кальция. Структура рифовых сообществ Панамы и Галапагоских островов в результате выцветания резко изменилась. Обширные площади, на которых отмерли полипы, заселили бентосные водоросли, которые в свою очередь способствовали росту популяций растительноядных животных, особенно морских ежей. Последние по типу питания относятся к «грызунам» - поедая водоросли, они выскабливают поверхность рифов, способствуя тем самым их эрозии. Обоснованно считается, что без восстановления коралловых популяций эти рифы скоро превратятся в обычные отложения известняка.

2.5. Влияние евтрофирования на коралловые рифы

Кораллы - это своеобразные «морские кактусы» и повышение содержания биогенов в воде для них столь же опасно, как повышение влажности для кактусов. При евтрофировании

кораллы практически всегда вытесняются быстро растущими водорослями. Такие явления наблюдаются у южной Флориды, где биогенные элементы поступают с очищенными сточными водами, из грунтовых вод и с сельскохозяйственных угодий, что стимулирует рост фитопланктона, донных водорослей, губок, тогда как кораллы в таких условиях слабеют и болеют [70]. Горные дождевые леса, прибрежные леса, мангры и луга морских трав - природные фильтры, задерживающие сток биогенных элементов с суши. Естественно, что уничтожая леса, человек усиливает воздействие биогенов.

В последние 30 лет австралийская печать периодически сообщает о приближающейся гибели Большого Барьерного рифа. В последней волне сообщений говорилось о загрязнении воды и евтрофировании морской среды из-за стоков городской канализации и поступления минеральных удобрений с полей [117]. В частности, сообщалось о повышении количества биогенных в воде в 4 раза, количества фитопланктона в 10-100 раз. Однако такие уровни отмечаются лишь вблизи мест сброса сточных вод. Данные по содержанию в морской воде растворенных фосфатов за 1978-82 гг., как считает автор цитируемой работы, ошибочны. Кроме того, полагает он, нельзя распространять результаты, полученные на 2-3 сильно загрязненных рифах, на все 3300 рифа, составляющих Большой Барьерный риф. Отсюда следует вывод, что никакие глобальные срочные меры по спасению указанного рифа пока не требуются. Тем не менее, если исходить из других сведений, борьба с евтрофированием в морском парке Большого барьерного рифа, обусловленного интенсивным загрязнением воды из антропогенных источников, рассматривается в качестве первейших природоохранных мероприятий [84]. Автор цитируемой статьи приходит к выводу, что необходимо срочно пересмотреть существующую концепцию сброса отходов в зоне морского парка. По данным [49], во внутренней и средней частях главной лагуны Большого Барьерного рифа зарегистрирован высокий уровень евтрофирования [49]. Этот процесс сопровождается усилением роста водорослей и преобладанием их нитчатых форм, а также распространением зарослей на участках, ранее занятых кораллами. Основным источником поступления веществ, стимулирующих процессы евтрофирования, являются сельскохозяйственные сточные воды, что приводит к всплескам численности водорослей, которые стали регистрироваться гораздо чаще, чем в прошлом. Автор цитируемой статьи считает, что современное обилие нанопланктона в некоторых реках, воды которых оказывают воздействие на состояние лагуны, является вполне достаточным для индукции массового размножения личинок морских звезд, поэтому необходима третичная очистка сточных вод, сбрасываемых в лагуну.

В работе [60] обсуждаются результаты исследований зависимости скорости роста кораллов от градиента загрязнения (о. Барбадос). В данном случае был измерен градиент евтрофирования и скорость роста сегментов ветвящихся кораллов *Porites porites* и крупного корал-

ла *Montastrea annularis*. Скорость роста измерялась с помощью методики взвешивания на плаву, что позволило измерить скорость роста уже через 3 дня у *Porites* и через 7 дней у *Montastrea*. У первого не обнаружено изменений в росте, связанных с повышенным уровнем концентрации фосфора или нитратов/нитритов, а рост второго был значительно угнетен. У западного побережья о. Барбадос в 1987-1990 гг. изучали также оседание молодых кораллов на окаймляющих рифах, сильнее и слабее подверженных антропогенному евтрофированию [79]. Установлено, что число молодых колоний кораллов и число видов кораллов, осевших на цементные блоки, выставленные на рифах, уменьшалось по мере усиления евтрофирования. Это было обусловлено как снижением скорости оседания кораллов, так и увеличением смертности после оседания на евтрофированных рифах, поскольку осевшие колонии учитывались через 3 года после установки блоков. На более евтрофированных рифах была понижена скорость оседания кораллов и на пластины, проверявшиеся ежемесячно. Последнее обусловлено тем, что на подверженных евтрофированию рифах либо меньше взрослых кораллов, либо понижена скорость размножения.

Своеобразие рифов в районе архипелага Байтынлонг (Тонкинский залив Южно-Китайского моря) определяется тем, что они существуют в условиях муссонного климата, влияния стока крупных и мелких рек, несущих охлажденные в зимнее время, заиленные и опресненные воды [11]. В результате число видов кораллов склерактиний в этом районе гораздо меньше, чем в остальных районах Вьетнама. В структуре рифовых сообществ заметно вытеснение кораллов, менее приспособленных к стрессам, что, в частности, является откликом и на высокое евтрофирование вод. Установлено, что в заливе рифы сходны по набору видов, но различаются по структуре коралловых поселений. Цель работы по исследованию рифов в 1997 г. состояла в том, чтобы изучить существенные для кораллов параметры окружающей среды, выявить распределение величин этих параметров вдоль рифов, одновременно описать видовой состав кораллов и связать эти параметры с характеристиками кораллового населения. Как отмечалось выше, евтрофирование морских вод способствует массовому развитию акантастеров, уничтожающих кораллы на значительных территориях.

2.6. Туризм и подводная охота

В настоящее время на международный аквариумный рынок (особенно в США) поставляется свыше 800 видов рифовых рыб, сотни видов кораллов и других беспозвоночных [51]. Большая часть рыб, обитающих в рифах, поступает из Филиппин и Индонезии. Эти страны считаются самыми богатыми в отношении морского биоразнообразия. Так, с одних только Филиппинских островов ежегодно экспортируется в Европу и США от 3 до 30 млн. коралло-

вых рыб [7]. По некоторым данным, в начале 1980-х гг. ежегодная мировая добыча кораллов составляет 50 т на сумму свыше 4,5 млн. франков [31]. Многие коралловые рифы оккупировали ныряльщики, при этом погубить фауну среднего рифа способны три любителя подводной охоты [21]. Еще Дорст (1968) отмечал, что коралловые рифы у юго-восточной оконечности Флориды, где для добычи кораллов использовали ручные буры и взрывчатку, буквально были разграблены.

Красный коралл - эндемик Средиземноморья - селится на подводных скалах на глубинах от 10 до 250 м. В настоящее время его коммерческая эксплуатация ведется в колониях, располагающихся ниже 60 м; надежная статистика добычи имеется во Франции, Италии, Греции, Хорватии, Испании, в странах Северной Африки она хуже [109]. На состояние колоний отрицательно влияют сборы кораллов ныряльщиками-любителями. Подводная охота уже привела к снижению запасов красного коралла в Средиземном море. Авторы статьи считают, что поскольку каждая колония красных кораллов имеет свои генетические отличия, нельзя допускать полного опустошения ни одной из них; следует внедрять ротацию промысла. В 1906 г. было добыто 122 т красного коралла [16].

Длительное время многие коралловые острова посещались искателями жемчуга и добытчиками перламутра. В Полинезии в первой половине XIX в., как пишет Герман Мелвилл [25], этот промысел был сосредоточен в руках Меренхоута, французского консула на Гаити, голландца по происхождению; по рассказам, он за один год отправил во Францию жемчужин на сумму в пятьдесят тысяч долларов. Обычно раковины добывали в лагунах и около рифов.

Детальное описание жемчужного промысла, существовавшего на коралловых рифах в XIX в., оставил нам Н.Н. Миклухо-Маклай [26]. Он, в частности, отмечал, что рифы, богатые жемчужными раковинами, находятся в западного берега о. Цейлон, у берегов Кондатчи, Арино и Манаар, и ловля их составляла монополию британского правительства. Вследствие долгой бесконтрольной ловли раковин рифы там так оскудели, что доход упал с 120000 до 10000 фунт. стерл., почему ловля жемчужных раковин в этих местностях была прекращена британским правительством на 16 лет (от 1838 до 1854 г.). Это обстоятельство было поводом для того, что предприимчивые люди стали разыскивать новые рифы и эксплуатировать случайно открытые, где ловля жемчужных раковин и жемчуга оказалась в разной степени доходной. В этом отношении особенно прославился архипелаг Поумоту в Тихом океане. Однако, пишет Н.Н. Миклухо-Маклай, эти времена прошли или проходят и наживаться шкиперам и торговцам с каждым годом труднее. По его данным, количество вывезенных с островов Поумоту жемчужных раковин составило за последние 25-30 лет приблизительно 25000 тонн, ценностью более чем 1 млн. фунт. стерл. В настоящее время (в 1887 г.) вывоз жемчужных раковин с этих островов упал с 1000 т до 200 т в год. Как в Индийском океане, так и здесь рифы заметно

оскудели. В последних годах со многих островов Меланезии (островов Адмиралтейства, Луб, Луизиады и др.) стали вывозить жемчужные раковины, выменивая у туземцев. У западного берега Австралии в 1880 г. ловля жемчужных раковин была ограничена Акульей бухтой. Промысел настолько увеличился, что правительство колонии Зап. Австралии назначило специального чиновника, который имел в своем распоряжении парусное судно для периодического посещения флотилии жемчугопромышленников. Рифы жемчужных раковин здесь тянутся от Акульей бухты к северу до 25 ю. ш. Жемчуг вывозился в Лондон и в Америку. По последним данным, пишет Миклухо-Маклай, по берегам Зап. Австралии около 1000 человек заняты жемчужным промыслом, из которых одна треть малайцы. Промысел существует также в Торресовом проливе, где на островах находятся станции промышленников. Подобных станций в 1880 г. было около 12, которые имели 88 судов. В Торресовом проливе уже несколько лет, как используется водолазный аппарат. В 1878 г. было собрано и вывезено 449 т перламутровых раковин. Почти каждый год в окрестностях Торрессова пролива открываются новые рифы. Н.Н. Миклухо-Маклай [26] пишет также, что рифы Меланезии служили источником отличного трепанга и перламутра, который сотни туземцев за небольшие куски железа или на незначительное количество мелких бус ловили и доставляли на корабль.

На коралловых рифах всегда и в достаточно больших количества добывались различные моллюски. Так, широко известны благодаря красивой глянцевой раковине рифовые ципреиды (*Supraeidae*). Раковинки двух видов рифовых ципреид, так называемые каури, в течение нескольких тысячелетий служили денежными знаками и имели очень широкое обращение [27, 43]. Это обстоятельство нашло отражение даже в их научных названиях: монетария-монета и моннетария-колечко (*Monetaria moneta*, *Monetaria annulus*). Они имели хождение в Древнем Китае, обнаружены в египетских пирамидах, скифских погребениях и других местах, отстоящих на десятки тысяч километров от коралловых рифов Тихого океана. В XII-XIV вв. каури играли роль денег даже на северо-западе Руси, в Новгородской и Псковской землях. Наиболее широкий международный денежный оборот с помощью раковин осуществлялся в XVII-XIX вв. Купцы ряда стран приобретали на островах Тихого и Индийского океанов огромное количество каури, стоимость которых в этих местах ничтожна, так как на каждом квадратном метре кораллового рифа можно было собрать до сотни моллюсков. На западном побережье Африки они ценились необычайно высоко, потому что в Атлантике они не водятся. Здесь ими расплачивались, покупая черных невольников для американских плантаторов. Есть сведения, что только в одну Гвинею в 1721 г. было ввезено 150 миллионов каури. К началу XX в. их ежегодный ввоз увеличился до 1 млрд. штук, а всего, по самым скромным подсчетам, в XIX в. с коралловых островов Тихого и Индийского океанов вывезли не менее 75 млрд. раковин каури. Значение каури в качестве монет поддерживалось в некоторых районах Индии до сере-

дины XX, а на некоторых рынках Океании и до сих пор могут предложить в качестве сдачи несколько маленьких раковин, имеющих уже не столько денежное, сколько коллекционное значение (для покупателя).

Если в 1985 г. объем мировой торговли организмами коралловых рифов для морских аквариумов составил 25-40 млн. долл., то в 1996 г. он приблизился к 200 млн. долл. [51]. Хотя точные данные о воздействии торговли на состояние рифов отсутствуют, минимальным его назвать никак нельзя. Из-за варварских способов добычи кораллов и рыбной ловли в Индонезии только 5-7% рифов находятся в хорошем состоянии. Автор цитируемой статьи считает, что США, как ведущий в мире импортер организмов коралловых рифов, несут главную ответственность за ущерб, наносимый экосистемам коралловых рифов.

3. Коралловые рифы и глобальная циркуляция углерода и кальция

Экосистемы коралловых рифов вовлечены в глобальную циркуляцию углерода, поскольку кораллы, формируя рифы, принимают деятельное участие в его круговороте. Воды коралловых построек дают первичной продукции углерода в 100 раз больше, чем в открытом океане [31]. Обусловленный парниковым эффектом подъем уровня океана сопровождается в условиях изобилия углерода быстрым ростом рифов - в среднем 10 мм в год при росте их массы от 1 до 3 кг/м² в год [90]. Одновременно коралловые рифы выделяют значительное количество CO₂ [83, 90]. Баланс диоксида углерода, подсчитанный для Большого Барьерного рифа, показал важнейшую роль двух процессов: фотосинтеза одноклеточных водорослей и формирования известкового скелета кораллов [90]. Фотосинтезирующие кораллы наиболее активно потребляют CO₂ в дневное время, как правило, в несколько раз больше, чем выделяют углекислому при дыхании [93]. Рифы островов Рюкю могут фиксировать 4,3 млн. т CO₂ в год, или 1,3% годовой его эмиссии во всей Японии, а если распространить на все тропические регионы мира предложенную в Японии идею превращения коралловых рифов в своеобразную «эко-фабрику» для фиксирования углекислого газа, можно будет связать 10% всей мировой эмиссии его [82].

Коралловые рифы являются мощными концентраторами кальция, представляя собой пример прямой аккумуляции карбоната кальция кораллами и другими организмами (на мелководье накапливаются также карбонатные ракушечники, фосфоритовые стяжения, глауконит и другие минералы, содержащие кальций). Недаром В.И. Вернадский образно называл коралловые рифы «лабораторией современного биогенного образования известняков» [5].

В отложениях многих лагун тропической зоны встречаются арагонитовые иглы, образование которых некоторые авторы связывают с жизнедеятельностью известковых водорослей

[36]. Рифообразующие кораллы фиксируют CaCO_3 в форме арагонита (при температурах воды до 30-35°C) или высокомагнезиального кальцита (при температурах 20-27°C), основным источником углерода которых является растворимый неорганический углерод в морской воде. В Мировом океане за год образуется 900 млн. т CaCO_3 [90]. По некоторым оценкам, современные рифы осаждают около половины поступающего в океан кальция. Например, в настоящее время только кораллы Большого Барьерного рифа фиксируют до 2,4 кг/м² CaCO_3 в год, или (при общей площади рифа около 20 тыс. км²) 50 млн. т CaCO_3 в год [101].

Согласно оценкам [85], к середине столетия (к 2065 г.) концентрации диоксида углерода в атмосфере может удвоиться по сравнению с доиндустриальным временем. При этом насыщенность морской воды карбонатом кальция в тропических широтах уменьшится на 30%, а скорость накопления биогенного арагонита снизится на величину от 14 до 30%. Это изменение для коралловых рифов является очень опасным, так как рифообразующие организмы секретируют метастабильные формы карбоната кальция, являющиеся неустойчивыми, и биогеохимические последствия такого сдерживающего рост воздействия на кораллы и другие организмы, накапливающие кальций в морских экосистемах, могут быть значительными. Существует точка зрения, что гибель кораллов, столь характерная сейчас для многих районов, может снизить скорость кальцификации, т. е. вывода CO_2 из атмосферы, что, в свою очередь, еще более усилит парниковый эффект [94]. По мнению некоторых специалистов [101], в связи с парниковым эффектом и подъемом уровня Мирового океана создадутся благоприятные условия для развития коралловых рифов. Парниковый эффект увеличит осаждение карбоната кальция на 40%. Наиболее быстрыми темпами накопление будет происходить на прибрежных коралловых рифах; это, вероятно, будет характерно и для океанических атоллов. Общее осаждение CaCO_3 может возрасти до 1800 млн. т/год, а через несколько столетий - до 3000 млн. т/год. В настоящее время коралловые рифы выделяют 111 млн. т углерода в год, что соответствует 2% от общего объема выделяемого CO_2 . В течение следующих 50 лет этот показатель увеличится до 4%, а в перспективе до 9%.

Возможность временного датирования, связанная с годичным ростом кораллов, делает их удобным объектом для изучения изменения содержания растворимого углерода в воде, а тем самым и CO_2 в атмосфере, путем оценки относительного содержания радиоактивного углерода в оболочке коралла. Подобное исследование было проведено на коралловых рифах, образованных *Montastrea annularis*, неподалеку от Белиза в Гондурасском заливе и во Флоридском проливе [62]. Анализ данных за 109-летний период (с 1868 по 1977 г.) установил значительное увеличение в морской воде, особенно в последние десятилетия, растворенного неорганического углерода, связанного со сжиганием ископаемого топлива, и ¹⁴C, образующегося при ядерных взрывах и эксплуатации энергетических ядерных установок. Характерно, что ди-

намика накопления радиоактивного углерода в рифах Белиза и Флориды показывает практически полное совпадение, что, по мнению автора цитируемой статьи, обусловлено влиянием Гольфстрима, в поверхностных водах которого в обоих районах содержание растворимого неорганического углерода одинаковое. Отмечается пригодность кораллов и использованных методов исследования для временной оценки содержания CO₂ в атмосфере в других районах мира.

4. Кораллы как индикаторы техногенного загрязнения морской среды

Биогеохимические характеристики скелетных образований кораллов используются для оценки качества морской воды [86]. В частности, коралловые рифы на островах Новая Каледония и Фиджи характеризовались различными специфическими концентрациями химических элементов, отражая вариабельность содержания различных металлов в окружающей среде. С целью выяснения роли кораллов как возможных биомониторов загрязнения морской среды тяжелыми металлами выполнены сравнительные исследования двух районов - загрязненного отходами заводов по обессоливанию воды и незагрязненного [72]. Было изучено распределение широкой группы металлов в скелете и мягких тканях полипов. Установлено, что животные в загрязненных местах концентрировали металлы в больших количествах, нежели в чистых, причем интенсивность накопления поллютантов коррелировало с изменением их концентраций во внешней среде.

Судя по всему, данные о содержании металлов в скелете кораллов более достоверно отражают их концентрации в окружающей среде, нежели сведения о распределении поллютантов в мягких тканях. Так, сопряженное изучение уровней содержания тяжелых металлов в воде, отложениях и кораллах из бухты Таунсвилл (Большой Барьерный риф, Куинсленд) показало следующее [65]. Концентрации свинца, меди и цинка в биотканях образцов из загрязненного района бухты оказались выше, чем в контрольном районе. Концентрации никеля и хрома также были выше в донных отложениях из бухты, однако металлы присутствовали в формах, относительно недоступных для биоты. Если данные о содержании некоторых металлов в скелетах кораллов хорошо соотносились с их концентрациями в окружающей среде (воде и донных отложениях), то уровни содержания металлов в мягких тканях не всегда коррелировали с таковыми в донных отложениях и скелетах. По мнению авторов статьи, различные соотношения концентраций металлов в тканях и скелете кораллов из бухты и из контрольной точки свидетельствуют о наличии определенного регулирования содержаний кадмия, свинца, цинка, хрома в мягких тканях полипов.

В работе [76] приводятся результаты исследований, проведенных в ноябре 1983 г. в Таиланде, целью которых было изучение влияния стоков оловоплавильного завода на кораллы *Pocillopora damicornis*. В стоках указанного завода было выявлено 23 металла - Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, Mn, Cu, Zn, Sr, Cr, Mo, Ni, Ba, Ce, La, Li, Nb, Sc, V, Y, Zr. Максимальное содержание в тканях и наружном скелете кораллов установлено для Ca, Na, Cu, Zn, Sr, Cr, Co, Mo, Ni, Ba, La, Li. В тканях живых кораллов концентрация Ca, Na, K в 2-20 раз выше, чем в контроле. В наружном скелете кораллов, находящихся в зоне загрязнения, содержания металлов не отличались от таковых в условно чистой зоне. Анализ распределения металлов в теле и наружном скелете кораллов на разных участках обследованной морской акватории показал, что оно неодинаково и зависят от направления течений, приносящих поллютанты. Максимальные концентрации металлов в теле и наружном скелете кораллов отмечены на тех участках, куда в процесс осенне-весенних (северо-восток) и весенне-осенних (юго-западных) муссонов идет значительное поступление токсикантов. Установлено также [69], что коралловые рифы побережья Таиланда страдают от мути, поднимаемой при добыче со дна оловянной руды.

Особенности отложения арагонита в скелете кораллов используют для определения химического состава среды их развития [87]. Наличие альтернативных групп с разной плотностью как индикаторов годичного роста кораллов дает возможность исследовать тенденции развития среды в историческом масштабе времени. В данном случае сезонные особенности изменений структуры изучаются по срезам кораллов и рентгено-радиографией. Авторами были исследованы образцы кораллового рифа, отобранные вблизи юго-западной оконечности о. Тобаго на загрязненном сбросами участке Карибского моря и на чистом участке. Средние содержания неорганического и общего фосфора (мкг/г) в скелетах кораллов составили соответственно: Санта-Крус $2,51 \pm 1,58$ и $5,96 \pm 1,82$; Бермуды $2,08 \pm 0,60$ и $8,21 \pm 1,30$; Кюросао $4,06 \pm 0,49$ и $5,25 \pm 0,47$; Тобаго $(1,11-2,11) \pm 0,67$ и $(3,45-4,15) \pm 1,01$. Установлено, что в кораллах, распространенных в зонах загрязнения, присутствие существенных количеств фосфора в их известковом скелете было связано с влиянием сточных вод и других источников загрязнения и является показателем начала и степени евтрофирования водной среды. Минимальная вариация уровней фосфора за последние 30 лет приходится на первую половину 1970-х гг., но четких временных тенденций не установлено. Тем не менее авторы пришли к выводу, что при продолжающемся и постоянно увеличивающемся сбросе сточных вод экосистемам кораллов будет нанесен значительный ущерб. Следует отметить, что коралловые рифы Центральной Америки, особенно расположенные на Карибском берегу Коста-Рики, подвергаются сильному антропогенному воздействию, в определенной степени обусловленного поступлением в море химикатов, применяемых на банановых плантациях Рио-Эстрелла [71].

На четырех станциях, расположенных на двух коралловых островах в заливе у юго-восточного побережья Индии, с июля 1994 г. по июнь 1995 г. ежемесячно отбирались пробы отложений коралловых рифов и донных отложений, на которых растет морская трава [88]. Максимальным оказалось содержание железа - 1152-5756 мг/кг, марганец - 46-128, цинк - 15-31, медь - 8-29 мг/кг. Авторы статьи считают, что содержания цинка и меди свидетельствуют о слабом техногенном загрязнении акватории изученного залива. Концентрации металлов в отложениях уменьшались с увеличением содержания песчаной фракции, поэтому в целом уровень металлов в более грубозернистых рифовых отложениях ниже, чем в преимущественно глинистых отложениях участков с развитием морской травы. Установлено также, что на одном острове содержания железа, марганца и меди в отложениях рифа и на участках с морской травой значительно различались, тогда как для другого острова эти различия были незначительны. Для обоих островов характерна существенная разница месячных концентраций цинка в отложениях рифа и участков с морской травой, что свидетельствует о высокой подвижности этого металла и его постоянном перераспределении между различными частями морской экосистемы.

В поверхностных донных отложениях между побережьем Австралии и Большим Барьерным рифом по профилю длиной 18 км при удалении от берега увеличиваются содержания кислотно-растворимого вещества (от 20 до 36%) и кальция (от 12 до 47 мг/г), представленных главным образом кальцитом с небольшим количеством арагонита [50]. Максимум содержания железа (32 мг/г) в отложениях отмечен на удалении в 10 км от коренного берега. Источник железа - привнос горных пород континента. Цинк в отложениях ведет себя аналогично железу (коэффициент корреляции $r=0,932$), т. е. его источником также являются горные породы побережья. Содержание меди в рассматриваемом направлении закономерно уменьшается (от 17 до 2 мкг/г). Между распределением меди и железа и меди и цинка связь отсутствует. Основным источником меди является гавань Кэрнс, где металл, судя по всему, переходит в водорастворимую форму из ранее использовавшейся краски (для предотвращения обрастаний судов). Непосредственно в районе кораллового рифа окружающая среда практически не загрязнена вследствие слабого промышленного развития этой части страны и, очевидно, из относительно слабой миграции поллютантов по направлению от побережья к коралловым рифам. Авторы цитируемой работы считают, что полученные результаты являются характеристикой, в основном, самоконтролирующихся естественных процессов, свойственных незагрязненным акваториям. Наличие выраженных поверхностных и придонных течений способствует активному переносу поллютантов от источников техногенного загрязнения. Так, коралловые рифы Эйлата (залив Акаба, Красное море) подвергаются значительному загрязнению, источники которого находятся в 5-8 км к северу от них [46]. В ходе исследования использовался трассер-

краситель флуоресцентного типа. Было установлено, что загрязняющий материал переносится двумя путями: во взвешенном состоянии поверхностными течениями и в виде крупных частиц придонными течениями. Минимальная скорость переноса взвешенных частиц (размер 5-10 мкм) составляет 0,4 км в сут.; грубозернистый материал (100-200 мкм) движется со скоростью 0,04 км в сут. При такой скорости движения материал достаточно быстро достигает рифов и создает реальную угрозу нарушения этой уникальной экосистемы. Авторы справедливо считают, что использованный ими метод эффективен для изучения путей переноса загрязняющего материала в морской среде.

5. Программы по изучению, охране и восстановлению коралловых рифов

В настоящее время интерес к экологическим проблемам коралловых рифов возрос во многих странах мира. Разностороннее изучение коралловых рифов ведется в различных научных институтах, научных центрах, на биологических станциях, в том числе расположенных в непосредственной близости от рифов. Такие центры и стационары имеются во Флориде, на Кубе, Багамских островах, в Красном море, на Мадагаскаре, на Филиппинских, Гавайских и Марианских островах, Новой Каледонии и Новой Гвинее, в Австралии (в нескольких пунктах Большого Барьерного рифа) и в ряде других мест. Существует Международное общество (Международный совет) по изучению коралловых рифов. С 1982 г. издается международный журнал «Коралловые рифы». Осуществляются международные, национальные и региональные программы, направленные на изучение и рациональное использование экосистем коралловых рифов.

К настоящему времени создано несколько «рифовых» заповедников. Например, в 1960 г. близ берегов Флориды у острова Ки-Ларго организован заповедник коралловых рифов Ки-Ларго площадью 19500 га. В начале 1990-х гг. 6760 км² прибрежных вод Флориды с коралловыми рифами объявлены 9-м морским заповедником США; в его пределах повышены требования и введены ограничения для судоходства [56]. В Средиземном море учрежден французский подводный заповедник. В Бразилии, начиная с 1990-х гг., создан целый ряд национальных морских парков, включая акваторию коралловых рифов, резерват «Атол-даш-Рокаш», национальный морской парк «Аброльс». Морские заповедники имеются в Кении, Мозамбике, на Сейшелах. Крупнейший в мире морской заповедник площадью 344 тыс. км² создан в пределах Большого Барьерного рифа.

Существует Международная программа охраны и рационального использования экосистем коралловых рифов, в которой участвуют США, Япония, Филиппины, Франция, Швеция, Австралия, Ямайка, некоторые органы ООН, Всемирный банк, Международный совет по ис-

следованию коралловых рифов и другие организации [61]. В качестве Секретариата программы действует Межведомственный комитет, созданный в США; организованы региональные центры для Латинской Америки, Западной Африки, Тихого океана, Персидского залива с Красным морем и др. Стратегическая цель Программы - помочь тропическим странам сохранить экосистемы коралловых рифов с дополняющими их мангровыми зарослями и занятыми водорослями мелководьями. Программой предусматриваются такие мероприятия, как запрет рыбного промысла в коралловых рифах путем отравления вод цианидами, регулирование посещения коралловых рифов туристами, снижение загрязнения прибрежных вод, от которого гибнут кораллы. Страны-доноры (в основном США) уже выделили несколько миллионов долларов на разработку и осуществление программ комплексного управления прибрежными полосами в ряде тропических стран Центральной и Южной Америки, а также на создание международного (Иордания и Израиль) морского парка в заливе Акаба. В рамках Программы Япония и Австралия помогают Индонезии в разработке комплексных планов управления ее прибрежной зоной. На Гавайях проведено региональное совещание по обмену опытом управления коралловыми рифами, включая их изучение и охрану.

Международная морская организация (ИМО) - ведущая организация в мире, которая занимается проблемами международного судоходства, - предварительно одобрила предложение США по изменению правил международного судоходства [96]. Это позволит каждой стране устанавливать зоны, где запрещается бросать якорь крупным судам. Подкомитет по безопасности судоходства ИМО также поддержал предложение США о создании трех «безъякорных зон» для защиты хрупких коралловых рифов национального морского заповедника Flower Garden Banks, расположенного в северо-восточном секторе Мексиканского залива. Здесь бросают якорь многочисленные коммерческие суда перед или после захода в порты Техаса и Луизианы. Перетаскивание тяжелых якорей по коралловым рифам приводит к разрушению коралловых рифов, причем достаточно крупные их участки могут быть разрушены за несколько минут и погибнуть безвозвратно. Создание подобных «безъякорных зон» потребует нанесения их на навигационные карты всех стран. Эта мера ставить во главу угла профилактику, а не принуждение или ответственность за нанесение ущерба. Кстати, согласно законодательству США, если корабль повредит коралловый риф, то на судовладельца налагается штраф до 11 тыс. долл. за 1 м² разрушений [113].

Защите, охране и восстановлению флоры и фауны морских глубин была посвящена конференция Тихоокеанского общества по восстановлению коралловых рифов, прошедшая недавно в Вашингтоне [38]. Ее участники собрались, чтобы обсудить успехи и трудности реализации программы «Коралловые сады», разработанной американским биологом Остином Бауден-Кёби. Цель программы - всемерно помогать росту натуральной коралловой популяции

в Меланезийском архипелаге островов Фиджи, расширению морских территорий, защищенных от промыслового рыболовства, а также развитию экономики стран - участниц программы. Помимо государственных организаций в решении указанных проблем участвуют и крупные курорты, например, такие, как Шангри-Ла (Фиджи), где работают специальные «гиды по рифам», которые способствуют не только сохранению природы, но и развитию экотуризма как части промышленности и важной сферы экономики архипелага. В рамках программы «Коралловые сады» решено создать региональный тренировочный центр и трастовый фонд по защите окружающей среды, что должно принести дополнительные средства для дальнейшей работы по сохранению местных коралловых рифов.

Действует «Международная инициатива по коралловым рифам», которая ставит задачу укрепления международного сотрудничества для более эффективного решения проблем коралловых рифов и включающая несколько региональных программ [124]. Секретариат организации располагается на Филиппинах. Удачными примерами могут считаться программы развития туризма на Филиппинах, когда бывшие рыбаки получают работу в туристском бизнесе, или развитие морекультуры, например, разведение морских водорослей, когда местное население получает долю прибыли. Считается, что получившие новую работу рыбаки не станут заниматься сверхэксплуатацией ресурсов побережья или вести браконьерский промысел. В последнее время появились программы, которые стремятся привлечь частные капиталовложения в береговую зону. В то же время, как подчеркивает автор цитируемой публикации, большинство из комплексных программ управления побережьем, входящих в «Международную инициативу», не учитывают экономические факторы (для людей главное - повышение качества жизни). Кроме того, некоторые программы не состыкованы с планами развития страны.

Следует отметить, что на Филиппинах рациональному использованию и охране коралловых рифов в последние годы уделяется особое внимание, что вполне объяснимо, поскольку большинство из 7 тыс. островов, составляющих Филиппинский архипелаг, представляют собой исполинские коралловые рифы или сообщества рифов, которые веками были источником существования прибрежного населения. На Филиппинах рыболовство - источник существования свыше 1 млн. рыбаков, которые приносят экономике государства около 1 млрд. долл. в год [120]. В настоящее время рифам угрожает опасность сверхэксплуатации и хищнические методы рыболовства (чрезмерный вылов рыбы, деструктивные методы рыболовства, заиливание, загрязнение и др.). Уловы рыбы уже упали ниже уровня устойчивости здоровых коралловых рифов. Экономический урон прибрежному населению, занимающемуся рыбной ловлей, значителен. Программы спасения коралловых рифов на Филиппинах действуют с 70-х гг. [119]. Многие программы пытаются остановить упадок рифов путем установления режимов

устойчивого управления. Экономические выгоды от этих программ как будто превышают издержки капиталовложений [120]. Например, расходы на создание и поддержание островного морского заповедника сравнили с потерями от разрушения рифов и прибылью от управления рифами. Результаты сравнения показали, что экономические выгоды от управления рифами и увеличения уловов, а также от сборов с мелкомасштабного туризма намного превосходят издержки. Рифы к тому же привлекают растущее число местных и иностранных туристов. Туристы не только приносят доход индустрии туризма, но и часто бывают готовы платить за расходы по управлению рифами. В одном только заповеднике Маниби плата за вход приносит 300 тыс. долл. в год. В целом же экономика страны получает от туризма 1,35 млрд. долл. ежегодно. Управление рифами включает местные рыболовные общины, местные администрации и другие заинтересованные организации. В некоторых провинциях страны коралловые рифы взяты под юридическую охрану, а режимы устойчивого управления работают достаточно эффективно. Отчасти это является следствием интенсивных образовательных программ, в которые вовлечены рыбаки и большая часть местного населения. Участие населения и сотрудничество всех институтов, занимающихся управлением природными ресурсами, - ключевой элемент устойчивого управления коралловыми рифами в этих провинциях. Тем не менее, как подчеркивают авторы цитируемой работы, до достижения главной цели - устойчивой эксплуатации коралловых рифов - еще очень далеко. Предполагается, что более интегрированные формы управления могут помочь в разрешении многочисленных и часто взаимосвязанных проблем, что в конечном счете и спасет коралловые рифы Филиппин.

В 1990 г. была принята Программа изучения прибрежной продуктивности Карибского моря, предусматривающая организацию в 15 странах более 20 лабораторий [33]. В ее рамках с 1992 г. начаты систематические наблюдения за коралловыми рифами. Другую сеть аналогичных лабораторий предложено организовать в центральной и западной частях Тихого океана. По инициативе администрации Клинтона была создана Американская организация по защите коралловых рифов (Известия, 1999, 11 февраля). Центр прибрежных ресурсов университета Род-Айленд (США) и Бюро охраны окружающей среды Таиланда осуществляют экспериментальную программу по отвлечению туристов от кораллового рифа острова Пукет [69]. Для ныряльщиков было установлено 20 заякоренных платформ, куда согласились направлять свои суда туристические фирмы. Некоторые авторы считают, что поскольку спасти все погибающие коралловые рифы невозможно, то следует сосредоточить силы по охране их наиболее ценных (редких, высокопродуктивных) сообществ, а также лучше других противостоящих угрозе гибели [52]. Этой стратегии и следует подчинить наблюдения за коралловыми рифами и проводимые исследования. Многие коралловые рифы страдают от перелова рыбы и от хищнической ее добычи с помощью динамита и отравления воды, что уже требует глобального их

обследования, однако для этих целей часто не хватает ни средств, ни специалистов. Возникла идея привлечь к таким обследованиям ныряльщиков и пловцов-любителей из местного населения, прошедших минимальное обучение. В 1996-1998 гг. такая программа была поддержана ООН и осуществлялась в 31 стране [75]. Подтвердилось плохое состояние коралловых рифов в Карибском районе, где они замещаются скоплениями водорослей. В Микронезии на основе материалов обследования принимаются меры по упорядочению использования коралловых. Считается, что в целом данная программа себя оправдала.

В первой половине 1996 г. было проведено обследование коралловых рифов султаната Оман, выполненное Министерством местного самоуправления и экологии [47]. Оно дало новую информацию о модели распределения кораллов в Омане и выявило воздействие, реальные и потенциальные угрозы коралловым сообществам с целью подготовки национального плана управления рифами (первая стадия выполнения национального плана управления береговой зоны). Воздействие на коралловые рифы Омана оказывают как природные, так и антропогенные факторы, результатом чего является значительная и широкомасштабная деградация рифов. Самое главное антропогенное воздействие оказывает рыболовство. К числу других факторов относятся строительство в береговой зоне, индустрия отдыха, загрязнение нефтью, евтрофирование. Среди природных факторов к самым значительным принадлежат: пожирание кораллов *Acanthaster planci*, ущерб от штормов, болезни кораллов и потепление климата. Есть и другие факторы, но они, как считается, менее значимые. В отношении антропогенных воздействий обнаружены существенные региональные различия, что вызвано демографической ситуацией в береговой зоне и деятельностью человека. В частности, 80% обследованных участков в разной степени были затронуты антропогенным воздействием; 69% страдали от рыболовства.

Коралловые рифы Шри Ланки по протяженности не превышают 32 км при длине береговой линии 1585 км. Прибрежные районы включают 300 км пляжей с дюнами, около 40 лагун (большая часть окаймлена манграми), 45 речных эстуариев, скопления водорослей. Администрация по акваториям совместно с Министерством охраны окружающей среды Шри Ланки организовали на рифах два резервата (из 20 планируемых), но ввиду отсутствия реальной охраны их состояние больше зависит от удаленности, чем от официального статуса [104]. Все виды строительных работ в пределах первых 2-км полосы моря и 300-м суши осуществляются только по специальным разрешениям Администрации по акваториям.

Недавно в Персидском заливе с помощью властей Дубаи были выполнены обследование и картографирование сообществ коралловых рифов и их пространственного положения с помощью видеосъемки [106]. Прозрачность воды и ровное дно позволяли использовать подводные фотокамеры, с помощью которых удавалось устанавливать не только расположение со-

обществ коралловых рифов, но также их видовой состав, а равно кораллы, погибшие в 1996 г. из-за повышения температуры воды. Одиночные кораллы с замедленным ростом отмечались на песчаном дне; среди них почти не было погибших. Одна из задач работы - установить места погибших коралловых рифов с целью их искусственного возобновления.

Еще в 1960-е гг. нефтяным компаниям было отказано в разрешении вести разведочное бурение в зонах Большого Барьерного рифа [78]. Грубые прикидки показали, что туристское значение парка выше, чем стоимость нефти в его недрах. По этой причине запрещена и добыча известняка и морского песка. Парк ежегодно посещает свыше 2 млн. чел., это соответствует туристскому буму для других национальных парков. Современные расчеты «предполагаемых платежей» туристов (т. е. их готовности платить за право посещения морского парка, сверх затрат на транспорт и жилье и т.д.) показывают, что туристские достоинства парка оцениваются выше, чем возможные доходы от сдачи в аренду нефтяных месторождений. Например, новый вид туризма - так называемый «дайвинг» (от английского глагола «to dive» - нырять, погружаться) - прогулки по садам коралловых рифов только в Австралии приносит казне 2 млрд. австралийский долларов ежегодно.

6. Создание искусственных рифов

В последние годы получают развитие работы по созданию искусственных рифов, которые ведутся главным образом в двух направлениях: трансплантация кораллов в новые места обитания и создание рифов на специальных (обычно цементных) блоках [97]. Особую разновидность представляют работы по созданию так называемых техногенных рифов с использованием отработанных автомобильных покрышек, автомобилей, бытовой техники и пр. Некоторые фирмы США предлагают искусственные образования, способные заменить утраченные площади естественных рифов, по цене 150-2000 долл./м² [95]. Особенно активно искусственные рифы создаются у берегов Калифорнии (автомобильные покрышки, бытовая техника, автомашины и пр.), Японии, Италии, Южной Кореи, Испании. Считается, что восстановление поврежденных участков коралловых рифов не должно сводиться к их «простому» физическому воссозданию, а следует добиваться того, чтобы искусственно восстановленные рифы выполняли прежние экологические функции, обеспечивали разнообразие мест обитания [103].

На Мальдивских островах осуществляется экспериментальная программа, главной целью которой является оценка возможности и целесообразности создания искусственных рифов [55]. В соответствии с этой программой на одном из участков рифов, подвергшихся значительному разрушению, вблизи столицы Мальдив Мале, была создана искусственная структура из бетонных блоков, имеющих разную форму и структуру поверхности, общим весом 360

т. Спустя год плотность населения и видовое разнообразие рыб, а также их масса были такими же или выше чем на природных рифах, хотя структура ихтиосообщества значительно отличалась. Первые кораллы *Pocillopora damicornis* появились спустя 6,5 месяцев после создания искусственного рифа. Через 3,5 года на ней имелось около 500 колоний диаметром до 25-30 см. Средняя максимальная плотность колоний на наружных вертикальных поверхностях бетонных блоков составляла 31 кв. м по сравнению с менее 2 кв. м на горизонтальных поверхностях. В сообществе доминировали кораллы родов *Acropora* и *Pocillopora*, составлявшие соответственно 50 и 45% всего сообщества, формировавшие однако лишь 5% массивных колоний. Относительное обилие тех же видов на природных рифах равнялось соответственно 77 и 9%, но они формировали 14% массивных колоний. Через 8 месяцев после пересадки колоний с природных рифов на искусственный 19-37% их было оторвано волнами. В последующем потери уменьшались, однако смертность прикрепившихся колоний достигала 23-31%. Спустя 29 месяцев после пересадки сохранялось 41-59% колоний. Делается вывод о нецелесообразности пересадки колоний на искусственный риф с целью ускорения восстановления природной экосистемы, тем более что она сопряжена с нарушением поверхности естественных рифов. Считают, что для создания типичного кораллового сообщества на искусственном рифе требуется несколько десятков лет, хотя первичное покрытие может сформироваться значительно раньше.

Стоимость восстановления 1 м² кораллового рифа в пределах Рифового заповедника во Флориде оценивается в 2893 долл. [113]. Для искусственных рифов в качестве своеобразного остова здесь применяют стальные конструкции, пластики, дерево, старые покрышки и др. материалы, но чаще - естественный известковый камень и бетон. Для быстрого образования биопленки существенно присутствие железа. Если требуется восстановить разрушенный коралловый риф, то важно знать, как он располагался относительно волн, чтобы новая конструкция воспроизводила его затишные зоны, а его конфигурация обеспечивала убежища для рыб и других поселенцев. Последних желательно «рекрутировать» с соседних коралловых рифов. Одно из новшеств - химические вещества, привлекающие новых поселенцев. Об успехе восстановления рифа можно судить только через 5-10 лет. Для туристов некоторые конструкции выполняют в форме людей, кораблей и т. п. Например, на песчаном дне под территориальными водами США можно увидеть списанный военный самолет, старые вагоны нью-йоркского метро, потрескавшиеся фарфоровые туалеты, автомобили и даже межконтинентальные баллистические ракеты [99]. Имея твердые поверхности, на которых могут прикрепляться ракушки, кораллы и губки, они предположительно должны создавать ранее не существовавшие морские экосистемы. Автор цитируемой статьи считает, что такие проекты по охране окружающей среды скорее напоминают сброс отходов открытое море, пока не выработано

никаких национальных норм и стандартов в отношении того, какие материалы можно использовать для техногенных (искусственных) рифов. Действительной причиной этого помешательства является не сохранение рыбных богатств, как утверждают спортивные рыбаки и ныряльщики, активно лоббирующие создание подобных сооружений, а прибыль, получаемая в результате рыболовства и туризма или сэкономленная вследствие дешевизны свалка отходов вместо их переработки или утилизации.

Возникновение искусственных рифов не всегда и не везде является положительным моментом. Так, были исследованы коралловые поселения на опорах нефтедобывающих платформ в Южно-Китайском море, установленных в 1984-1988 гг. [23]. Образовавшийся в течение двух лет на металлических конструкциях свай биогенный субстрат обусловил начало третьей фазы сукцессий тропического обрастания: возникновение искусственного кораллового рифа. Однако заселение массовых видов рифообразующих кораллов может повлечь накопление колоссальных масс и объема карбоната кальция за счет формирования каркаса рифа, что может создать острую аварийную ситуацию.

Заключение

В настоящее время природа коралловых рифов сильно изменена человеком. Антропогенное воздействие уже оказывает негативное влияние на коралловые острова, расположенные на значительном удалении от промышленных центров.

В 1999 г. в Форт-Лодердейле (Флорида, США) состоялась международная конференция, на которой 480 ученых из 34 стран, Гуама, Пуэрто-Рико и Виргинских островов обсуждали важнейшие проблемы современного состояния коралловых рифов, текущие аспекты их оценки, мониторинга и восстановления, а также пути повышения международного сотрудничества в изучении и охране природы этих уникальных экосистем. В процессе обсуждения выявились 6 главных тем [115]: 1) существуют убедительные доказательства систематической деградации кораллов и коралловых рифов во всем мире; 2) рифовые системы уже демонстрируют отчетливую, измеримую реакцию на глобальные стрессы, причем в будущем, если не принять соответствующих мер, этот процесс ускорится; 3) любые попытки защитить оставшиеся здоровые рифы от дальнейшей деградации должны включать срочные решительные меры действия от локального до глобального масштаба; 4) необходимы протоколы комплексной оценки риска и управления рифами в средней и дальней перспективе с привязкой ко времени; 5) создание глобальной сети морских охраняемых территорий, включающих коралловые рифы, обеспечит выживание в долгосрочной перспективе ценных сообществ; 6) наука о восстановлении и реабилитации коралловых рифов находится в стадии формирования и обещает облег-

чить восстановление рифов, но для этого необходимо разработать экспериментально подтвержденные эффективные инструменты восстановления рифов. Особое внимание, по мнению участников конференции [53], следует уделять развитию методов экологического мониторинга коралловых рифов и разработке необходимых для этого объективных показателей их состояния.

У жителей Маршалловых островов бытует миф, согласно которому коралловые атоллы без особого труда создал бог Лова [32]. Стоило ему издать магический, похожий на глухое ворчание звук, как появились атоллы. Осталось лишь расположить их в соответствующих местах океана. Это и поручили сделать человеку, которого тоже создал Лова. Человеку не только даровали жизнь, но и вручили большую корзину, в которую сложили все будущие атоллы. Дальше все было очень просто - человек взял корзину и начал бросать атоллы в море: один направо, другой - налево... В настоящее время их дальнейшая судьба в существенной мере зависит от потомков этого человека.

Литература

1. Амос У.Х. Живой мир островов: Пер. с англ. - М.: Гидрометеиздат, 1987. - 256 с.
2. Биология коралловых рифов: Морфология, систематика, экология. - М.: Наука, 1980. - 262 с.
3. Браун Б.Э., Огден Дж.К. Выцветание кораллов // В мире науки, 1993, № 2-3, с. 88-95.
4. Бээкман В. На затылке земного шара. - Таллин: Ээсти раамат, 1983. - 336 с.
5. Вернадский В.И. Живое вещество. - М.: Наука, 1978. - 358 с.
6. Воронов А.Г., Игнатьев Г.М. Природно-территориальные комплексы островов океана и некоторые особенности их биоты // Проблемы общей физической географии и палеогеографии. - М.: Изд-во МГУ, 1976, с. 92-106.
7. Герлах С.А. Загрязнение морей: Диагноз и терапия: Пер. с англ. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 263 с.
8. Даниельссон М.-Т., Даниельссон Б. Отравленный рай: Пер. со швед. - М.: Прогресс, 1989. - 288 с.
9. Дарвин Ч. Путешествие натуралиста вокруг света // Сочинения, т. 1: Пер. с англ. - М.-Л.: Государственное изд-во биологической и медицинской лит-ры, 1935, с. 1-605.
10. Дарвин Ч. Строение и распределение коралловых рифов // Сочинения, т. 2: Пер. с англ. - М.-Л.: Государственное изд-во биологической и медицинской лит-ры, 1936.
11. Даутова Т.Н., Латыпов Ю.Я., Даутов С.Ш. Состав и структура коралловых сообществ архипелага Байтылонг (Тонкинский залив Южно-Китайского моря) в различных экологических условиях // Биология моря, 1999, 25, № 2, с. 106-107.

12. *Добровольский В.В.* Геохимия тропических островов // Природа, 1985, № 11, с. 40-51.
13. *Добровольский В.В.* Геохимия атоллов // Природные и антропогенноизмененные биогеохимические циклы. Тр. Биогеохимической лаборатории, т. XXI. - М.: Наука, 1990, с. 3-34.
14. *Добродеев О.П.* Особенности почвообразования и геохимии ландшафтов низких коралловых атоллов Океании // Проблемы общей физической географии и палеогеографии. - М.: Изд-во МГУ, 1976, с. 83-91.
15. Жизнь животных. Т. 2. Беспозвоночные. - М.: Просвещение, 1968. - 563 с.
16. *Иванов А.В.* Промысловые водные беспозвоночные. - М.: Сов. наука, 1955. - 355 с.
17. *Каплин П.А.* Новейшая история побережий Мирового океана. - М.: Изд-во МГУ, 1973. - 265 с.
18. *Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г.* Берега. - М.: Мысль, 1991. - 479 с.
19. *Клаузевиц В.* Биоценоз кораллового рифа // Экологические очерки о природе и человеке: Пер. с нем. - М.: Прогресс, 1988, с. 322-332.
20. *Кукал З.* Скорость геологических процессов: Пер. с чешск. - М.: Мир, 1987. - 246 с.
21. *Кусто Ж.-И., Диоле Ф.* Жизнь и смерть кораллов: Пер. с франц. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. - 176 с.
22. *Латыпов Ю.Я.* Склерактиниевые кораллы южного Вьетнама // Биология моря, 1978, № 5, с. 12-19.
23. *Латыпов Ю.Я.* Пионерные поселения рифообразующих кораллов на свайных опорах нефтедобывающих платформ в Южно-Китайском море // Биология моря, 1991, № 3, с. 93-99.
24. *Маргалеф Р.* Облик биосферы: Пер. с англ. - М.: Наука, 1992. - 214 с.
25. *Мелвилл Г.* Ому: Пер. с англ. - М.: Географгиз, 1960. - 278 с.
26. *Миклухо-Маклай Н.Н.* Собрание сочинений. Т. 2. - М.: Наука, 1993. - 528 с.
27. *Наумов Д.В., Пропп М.В., Рыбаков С.Н.* Мир кораллов. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 360 с.
28. *Одум Ю.* Основы экологии: Пер. с англ. - М.: Мир, 1975. - 740 с.
29. *Преображенский Б.В.* Современные рифы. - М.: Наука, 1986. - 244 с.
30. *Рамад Ф.* Основы прикладной экологии. Воздействие человека на биосферу: Пер. с франц. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 543 с.
31. *Сребродольский Б.И.* Коралл. - М.: Наука, 1986. - 136 с.
32. *Стингл М.* Приключения в Океании: Пер. с чешск. - М.: Правда, 1985. - 592 с.
33. *Стингл М.* Таинственная Полинезия: Пер. с чешск. - М.: Наука, 1991. - 224 с.
34. *Стоддарт Д.* Коралловые рифы и острова // Непокойный ландшафт: Пер. с англ. - М.: Мир, 1981, с. 103-110.
35. *Хемингуэй Э.* Собрание сочинений в шести томах: Т. 6. - М.: Нугешиинвест, 1993. - 351 с.
36. Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков. - М.: Наука, 1979. - 536 с.

37. *Шамиссо А.* Путешествие вокруг света: Пер. с нем. - М.: Наука, 1986. - 280 с.
38. *Шаталова А.* Экотуризм на службе матушки-природы. Коралловые сады цветут круглый год // Поиск, 2002, № 17 (675), с. 11.
39. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. - М.: Недра, 1998. - 366 с.
40. *Швецов М.С.* Петрография осадочных пород. - М.: Госгеолтехиздат, 1958. - 416 с.
41. *Шернард Ф.П.* Морская геология: Пер. с англ. - Л.: Недра, 1962. - 461 с.
42. *Шернард Ч.* Жизнь кораллового рифа: Пер. с англ. - Л.: Гидрометеиздат, 1987.- 184 с.
43. Эврика-87. - М.: Мол. гвардия, 1987. - 316 с.
44. *Эттенборо Д.* Живая планета: Пер. с англ. - М.: Мир, 1988. - 328 с.
45. *Яковлев Н.Н.* Живое и среда: Молекулярные и функциональные основы приспособления организма к условиям среды. - Л.: Наука, 1986. - 175 с.
46. *Abelson A., Shteinman B., Fine M., Kaganovsky S.* Mass transport from pollution sources to remote coral reefs in Eilat (gulf of Aqaba, Red Sea) // Mar Pollut. Bull., 1999, 38, № 1, p. 25-29.
47. *Al-Jufaili S., Al-Jabri M., Al-Baluchi A. et al.* Human impact on coral reefs in the Sultanate of Oman // Estuarine, Coast. and Shelf Sci., 1999, 49, A, p. 65-74.
48. *Andrié Ch., Jean-Baptiste Ph., Pierre C. et al.* Pore water geochemistry and mixing processes within the Tahiti barrier reef // Geochim. et Cosmochim. Acta, 1998, 62, № 16, p. 2809-2822.
49. *Bell P.R.F.* Must GBR pollution become chronic before management reacts? // Search., 1991, 22, № 4, p. 117-119.
50. *Brady B.A., Johns R.B., Smith J.D.* Trace metal geochemical association in sediments from the Cairns region of the Great Barrier Reef, Australia // Mar. Pollut. Bull., 1994, 28, № 4, p. 230-234.
51. *Bruckner A.W.* New threat to coral reefs: Trade in coral organisms // Issues Sci. and Technol., 2000, 17, № 1, p. 63-68.
52. *Buddemeier R.W.* Is it time to give up? // Bull. Mar. Sci., 2001, 69, № 2, p. 317-326.
53. *Castro Nohora Galvis* Monitoring ecological and socioeconomic indicator for coral reef management in Colombia // Bull. Mar. Sci., 2001, 69, № 2, p. 847-859.
54. *Cavanagh J.E., Burns K.A., Brunskill G.J., Coverntry R.J.* Organochlorine pesticide residues in soils and sediments of the Herbert and Burdekin river regions, North Queensland - implications for contamination of the Great Barrier Reef // Mar. Pollut. Bull., 1999, 39, № 1-12, p. 367-375.
55. *Clark S., Edwards A.J.* An evaluation of artificial reef structures as tools for marine habitat rehabilitation in the Maldives // Aquat. Conserv.: Mar. and Freshwater Ecosyst., 1999, 9, № 1, p. 5-21.
56. Clean air and other environmental legislation signed into law in November // J. Air and Waste Mahag. Assoc., 1991, 41, p. 66-68.
57. *Cohen A.L., Hart S.R.* The effect of colony topography on climate signals in coral skeleton // Geochim. et Cosmochim. Acta, 1997, 61, № 18, p. 3905-3912.
58. *Dahl A.L., Lamberts A. E.* Environmental impact on a Samoan coral reef: a resurvey of Mayor`s 1917 transect // Pacif. Sci., 1977, 31, № 3, p. 309-319.

59. *Daly R.A.* Coral reefs - a review // *Amer. J. Sci.*, 1948, v. 246, p. 193-207.
60. *Davies P.S.* A rapid method for assessing growth rates of corals in relation to water pollution // *Mar. Pollut. Bull.*, 1990, 21, № 7, p. 346-348.
61. *Drake S.F.* The international coral reef initiative: a strategy for the sustainable management of coral reefs and related ecosystems // *Coastal Manag.*, 1996, 24, № 4, p. 279-299.
62. *Druffel E.M.* Radiocarbon in annual coral rings of Belize and Florida // *Radiocarbon*, 1980, 22, № 2, p. 363-371.
63. *Edinger E.N., Jompa J., Limmon G. et al.* Reef degradation and coral biodiversity in Indonesia: effects of land-based pollution, destructive fishing practices and changes over time // *Mar. Pollut. Bull.*, 1998, 36, № 8, p. 617-630.
64. *Epstein N., Bak R.P., Rinkevich B.* Toxicity of third generation dispersants and dispersed Egyptian crude oil on Red sea coral larvae // *Mar. Pollut. Bull.*, 2000, 40, № 6, p. 497-503.
65. *Esslemont G.* Heavy metals in seawater, marine sediments and corals from the Townsville section // *Mar. Chem.*, 2000, 71, № 3-4, p. 215-231.
66. *Glider W.V., Pardy R.L.* Algal endozoic symbioses: an introduction and bibliography // *Selected Papers in Phycology, II.* - Phycological Society of America, Lawrence, Kansas, 1982, p. 761-772.
67. *Glynn P.W., Rumbold D.G., Snedaker S.C.* Organochlorine pesticide in marine sediment and biota from the Northern Florida reef tract // *Mar. Pollut. Bull.*, 1995, 30, № 6, p. 397-402.
68. *Goldman B.* Environmental management in Yap, Caroline Islands: can the dream be realized? // *Mar. Pollut. Bull.*, 1994, 29, № 1-3, p. 42-51.
69. *Hale L.Z., Olsen S.B.* Coral reef management in Thailand: A step toward integrated coastal management // *Oceanus*, 1993, 36, № 3, p. 27-34.
70. *Hallock-Muller P.* Coastal pollution and coral communities // *Underwater Natur.*, 1990, 19, № 1, p. 15-18.
71. *Hands M.R., French J.R., O'Neill A.* Reef stress at Cahaita Poinr, Coata Rica: Antropogenically enhanced sediment influx or natutal geonorphic change? // *J. Coast. Res.*, 1993, 9, № 1, p. 11-25.
72. *Hanna R.G., Muir G.L.* Red Sea corals as biomonitors of trace metal pollution // *Environ. Monit. And Assessment*, 1990, 14, № 2-3, p. 211-222.
73. *Haynes D., Müller J., Carter S.* Pesticide and herbicide residues in sediments and seagrasses from the Great Barrier Reef world heritage area and Queensland coast // *Mar. Poolut. Bull.*, 2000, 41, № 7-12, p. 279-287.
74. *Henderson G.* Coral decline // *Ecologist*, 2001, № 58, p. 58.
75. *Hodgson G.* Reef check: the first step in community-based management // *Bull. Mar. Sci.*, 2001, 69, № 2, p. 861-868.
76. *Howard L.S., Brown B.E.* Metals in *Pocillopora damicornis* to tin smelter effluent // *Mar. Pollut. Bull.*, 1987, 18, № 8, p. 451-454.

77. *Huber M.E.* An assessment of the status of coral reefs of Papua New Guinea // *Mar. Pollut. Bull.*, 1994, 29, № 1-3, p. 69-73.
78. *Hundloe Tor* The dollars and sense of environmental protection // *Search.*, 1995, 28, № 10, p. 309-312.
79. *Hunte W., Wittenberg M.* Effects of eutrophication and sedimentation on juvenile corals. II. Settlement // *Mar. Biol.*, 1992, 114, № 4, p. 625-631.
80. *Hutchings P., Payri C., Gabrié C.* The current status of coral reef management in French Polynesia // *Mar. Pollut. Bull.*, 1994, 29, № 1-3, p. 26-33.
81. *Johannes R.E.* Pollution and degradation of coral reef communities // *Tropical marine pollution*. - Elsevier: Amsterdam, 1975, p. 13-51.
82. *Kayanne H., Miyashi S.* The role of calcifying organisms in the global CO₂ cycle // *Biofutur.*, 1991, № 106, p. 76, 78.
83. *Kawahata Hodaka, Suzuki Atsushi, Goto Koichi* Coral reefs as sources of atmospheric CO₂ // *Geochem. J.*, 1999, 33, № 5, p. 295-303.
84. *Kinsey D.W.* Can we the nutrient issue for the reef? // *Search.*, 1991, 22, № 4, p. 119-121.
85. *Kleypas J.A., Buddemeier R.W., Archer D. et al.* Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs // *Science*, 1999, 284, № 5411, p. 118-120.
86. *Krasnov K.V.* Corals and molluscs as indicators of sea water quality // *Water Qual. Bull.*, 1977, 2, № 4, p. 10-11.
87. *Kumarsingh K., Laydoo R., Chen J.K., Suing-Chang A.M.* Historic records of phosphorus levels in the reef-building coral *Motastrea annularis* from Tobago, West Indies // *Mar. Pollut. Bull.*, 1998, 36, № 12, p. 1012-1018.
88. *Kumaresan S., Kumar N. V. V., Balasubramanian T., Subramanian A.N.* Trace metals (Fe, Mn, n and Cu) in sediments from the Gulf of Mannar region, southeast coast of India // *Indian. J. Mar. Sci.*, 1998, 27, № 2, p. 256-258.
89. *Leão Zelinda M.A.N., Dominguez Jasé M.L.* Tropical coast of Brazil // *Mar. Pollut. Bull.*, 2000, 41, № 1-6, p. 112-122.
90. *Lefevre A.* Les récifs coralliens ont-ils un impact sur l'effet de serre? Une question controversée // *Recherche*, 1991, 22, № 235, p. 1098-1099.
91. *Langreth R.N.* Bleached reefs // *Sci. News*, 1990, 138, № 23, p. 364-365.
92. Le blanchissement des coraux // *ORSTOM Actual.*, 1992, № 35, c. 6-11.
93. *McConnaughey T.A., Burdett J., Whelan J.F., Paull Ch. K.* Carbon isotopes in biological carbonates: respiration and photosynthesis // *Geochim. et cosmochim. acta*, 1997, 61, № 3, p. 611-622.
94. *Miller J.A.* Does coral bleaching mean global warming // *Bioscience*, 1991, 41, № 2, p. 77.
95. *Milon J.W., Dodge R.E.* Applying habitat equivalency analysis for coral reef damage assessment and restoration // *Bull. Mar. Sci.*, 2001, 69, № 2, p. 975-988.
96. Moves to protect Coral reefs from anchor damage // *Mar. Pollut. Bull.*, 2000, № 10, p. 804.

97. *Muzik By K.* Coral grief // *Technol. Rev.*, 1991, 94, № 3, p. 60, 62, 63, 66.
98. *Myers N.* Biodiversity and precantionary // *AMBIO*, 1993, 22, № 2-3, p. 74-79.
99. *Osterhoudt S.* Reefer madness // *Onearth.*, 2002, № 4, p. 8.
100. *Overpeck J., Cole F.* Role of coral, varved sediments and models in understanding global environmental change // *Eos*, 1990, 71, № 29, p. 983, 988-989.
101. *Pain S.* Coral reefs will thrive in the greenhouse // *New. Sci.*, 1990, 125, № 1706, p. 30.
102. *Pichler T., Veizer J., Hall Gwendy E.M.* Natural input of arsenic into a coral-reef ecosystem by hydrothermal fluids and its removal by Fe(III) oxyhydroxides // *Environ. Sci. and Technol.*, 1999, 33, № 9, p. 1373-1378.
103. *Precht W.F., Aronson R.B., Swanson D.W.* Improving scientific decision-making in the restoration of ship-grounding sites on coral reefs // *Bull. Mar. Sci.*, 2001, 69, № 2, p. 1001-1012.
104. *Rajasuriya A., White A.T.* Coral reefs of Sri Lanka: Review of their extent, condition, and management status // *Coastal Manag.*, 1995, 23, № 1, p. 77-90.
105. *Renon J.-P.* Resifs et lagons: SOS l'emprise du corail // *Sci. et vie.*, 1991, Hors ser., № 176, p. 86-96.
106. *Riegl. B., Korrubel J.L., Martin C.* Mapping and monitoring of coral communities and their spatial patterns using a surface-based video method from a vessel // *Bull. Mar. Sci.*, 2001, 69, № 2, p. 869-880.
107. *Rodgers K.A., McAllan I.A.W., Cantrell C., Ponwith B.J.* Rose Atoll: an annotated bibliography // *Techn. Repts Austral. Mus.*, 1993, № 9, p. 1-37.
108. *Salvat B.* Le corail témoigne: la terre se réchauffe // *Sci. et vil.*, 1991, № 887, p. 30-33.
109. *Santangelo G., Abbiati M.* Red coral: conservation and management of an over-exploited Mediterranean species // *Aquat. Conserv.: Mar. and Freshwater Ecosyst.*, 2001, 11, № 4, p. 253-259.
110. *Senn D.G., Glasstetter M.* On the occurrence of barnacle-reefs around Cocos-Island, Costa Rica // *Senckenberg. marit.*, 1989, 20, № 5-6, p. 241-249.
111. *Sheppard C., Price A.* Will marine life survive the Gulf war? // *New Sci.*, 1991, 129, № 1759, p. 36-40.
112. *Shinn E.A.* The geology of the Florida keys // *Oceanus*, 1988, 31, № 1, p. 46-53.
113. *Spieler R.E., Gilliam D.S., Sherman R.L.* Artificial substrate and coral reef restoration: what do we need to know to know what we need // *Bull. Mar. Sci.*, 2001, 69, № 2, p. 1013-1030.
114. *Straughan R.P.L.* Pollution, dredging decimating Florida's reefs // *Nat. Fisherman*, 1972, 52, № 13, 3. 46-48.
115. *Thomas J. D., Dodge R. E.* Quik action needed for world's declining coral reefs: Results of the International conference on scientific aspects of coral reef assessment, monitoring, and restoration // *Earth Syst. Monit.*, 1999, 10, № 1, p. 12, 16.
116. *Walbran P.D., Henderson R.A., Jull A.J. et al.* Evidence from sediments of long-term. *Acanthaster planci* predation on corals of the Great Barrier Reef // *Scunce*, 1989, 245, № 4920B p. 847-850.

117. *Walker T. A.* Is the Reef really suffering from chronic pollution? // *Search.*, 1991, 22, № 4, p. 119-121.
118. *Wang Lirong, Zhao Huanting, Song Chaojing* // *Zhongguo xueshu qikan wenzhai=Chin. Sci. Abstr.*, 2001, № 1, p. 81-83.
119. *White A.T., Vogt H.P.* Philippine coral reefs under threat: lessons learned after 25 years of community-based conservation // *Mar. Pollut. Bull.*, 2000, 40, № 6, p. 537-550.
120. *White A.T., Vogt H.P., Arin T.* Philippine coral reefs under threat: the economic losses caused by reef destruction // *Mar. Pollut. Bull.*, 2000, 40, № 7, p. 598-605.
121. *Woesik R.V., Ayling A.M., Mapstone B.* Impact of tropical cyclone «Ivor» on the Great Barrier Reef, Australia // *J. Coast. Res.*, 1991, 7, № 2, p. 551-558.
122. *Wolf S.F., Bates J.K., Buck E.C. et al.* Physical and chemical characterization of actinides in soil from Johnston atoll // *Environ. Sci. and Technol.*, 1997, 31, № 2, p. 467-471.
123. *Woodwell G.M., Whittaker R.H., Reiners W.A. et al.* The biota and the world carbon budget // *Science*, 1978, 199, p. 141-146.
124. *Yap H.T.* Another look at coral reef degradation // *Mar. Pollut. Bull.*, 2001, 42, № 7, p. 527.
125. *Zann L.P.* The status of coral reefs in South Western Pacific islands // *Mar. Pollut. Bull.*, 1994, 29, № 1-3, p. 52-61.