

330.15/26

ВЛИЯНИЕ ИСТОЩЕНИЯ ОЗОННОГО ЭКРАНА ЗЕМЛИ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ ПРОДУКТИВНОСТЬ ОКЕАНА

Д-р биол. наук Е.А.Цихон-Луканина, канд. биол. наук О.Г.Резниченко – Институт океанологии РАН
Канд. биол. наук Т.А.Лукашева – Южное отделение Института океанологии РАН

Озонный слой стратосферы в последние десятилетия истощается под влиянием хозяйственной деятельности человека и некоторых крупномасштабных природных процессов, главным образом извержений вулканов. Это приводит к усилению у поверхности океана и континентов губительного для живых организмов ультрафиолетового излучения Солнца в области Б (УФ-Б, длина волны 280–320 нм).

В конце 70-х годов была впервые обнаружена "дыра" в озоновом слое над Антарктидой. В течение следующего десятилетия общее содержание стратосферного озона здесь понизилось почти вдвое, а "дыры" появлялись каждую весну. В последние годы в районах Австралии и Новой Зеландии периодически образуются "мини-дыры", существующие от нескольких дней до 2–3 недель и достигающие диаметра 3000 км (Хаттатов, 1990). Существенное уменьшение содержания озона наблюдается также в высоких широтах Северного полушария, особенно над Арктикой и Сибирью (Божков и др., 1995). По-видимому, на всех широтах этот процесс будет продолжаться и в следующем столетии (Stolarski et al., 1992). Это делает весьма актуальной проблему экологических последствий истощения озона для биосферы, сводящуюся к изучению влияния УФ-Б на флору и фауну.

В 1976 г. Всемирная метеорологическая организация приняла план глобального исследования изменений озонового слоя. Год спустя он был включен в Программу ООН по окружающей среде. С тех пор появилось довольно много исследований по экологическому аспекту этой проблемы (Израэль и др., 1994; Karentz et al., 1994; Häder et al., 1995). Рассмотрим влияние УФ-Б на планктон и бентос и оценим изменения биологической продуктивности океана.

Планктон. УФ-Б сильно влияет на жизнедеятельность гетеротрофных бактерий, особенно в поверхностных водах океана. Бактерионейстон в Черном, Балтийском и некоторых северных морях уже сейчас находится в стрессовой ситуации, ибо под действием УФ-Б снижается его разнообразие и численность, вплоть до полного исчезновения бактерий (Израэль, Цыбань, 1989; Израэль и др., 1992). В Средиземном море, в верхнем 5-метровом слое воды, УФ-Б подавляет активность бактериопланктона на 40 %.

При этом бактерии не адаптируются к излучению и не образуют защитных пигментов, а выделяемые ими во внешнюю среду ферменты инактивируются. Следовательно, повышение интенсивности УФ-Б при истощении озонового слоя может привести к увеличению концентрации растворенного органического вещества у поверхности океана, так как его потребление бактериями понизится (Herndl et al., 1993). Сходные результаты получены при исследовании бактерий Берингова и Чукотского морей в августе–сентябре 1993 г.: под УФ-Б биохимическое окисление глюкозы в Анадырском заливе снижалось на 15 %, в северной части Берингова моря и в бассейне Чирикова – на 40–50 % (Израэль и др., 1994).

У цианобактерий фотосинтез сильно угнетается УФ-Б, но у некоторых форм образуются защитные пигменты – сцитонемин и водорастворимые микоспорины. Виды, характеризующиеся коричневой окраской, лучше выносят высокую интенсивность УФ-Б, чем близкородственные зеленые (Garcia-Pichel, Castenholz, 1991; Häder et al., 1995).

Распространение планктонных одноклеточных водорослей ограничено верхними слоями воды, где они получают высокие дозы УФ-излучения, нарушающего структуру ДНК, фотосинтез, активность ферментов и ассимиляцию азота, а также обесцвечивающего пигменты клеток (Worrest, Häder, 1989; Döehler et al., 1991; Häder et al., 1991). УФ-Б влияет и на подвижность, и на механизмы ориентации одноклеточных водорослей (Walsby, 1987; Gosink et al., 1993; Häder, 1993).

Разные зоопланктеры сильно различаются по толерантности к УФ-Б. Это излучение губительно для многих видов копепод, а у выживших особей уменьшает плодовитость. И у других планктонных ракообразных, включая креветок и личинок крабов, уже при современной интенсивности УФ-Б на поверхности моря отмечена высокая смертность. Однако имеются виды, например личинки креветки *Pandalus platyceros*, более устойчивые и вполне выдерживающие повышенную интенсивность УФ-Б, наблюдающуюся при 16 %-ном истощении озонового слоя. Эуфаузида *Thysanoessa raschii* имеет порог толерантности, превышающий интенсивность УФ-Б при ожидаемых уровнях содержания озона весной

(Damkaer, 1982; Damkaer, Dey, 1983).

Повышенная интенсивность солнечного УФ-Б уменьшает скорость роста и выживание личинок рыб (Hunter et al., 1982). Рассчитано, что 16 %-ное истощение озонового слоя над шельфом Тихоокеанского побережья Северной Америки в июне должно привести к увеличению смертности личинок анчоуса на 50–100 % (на глубине 0,5 м от поверхности моря). Если учесть, что эти личинки встречаются во многих регионах, где сходные интенсивности УФ-Б наблюдаются в июне–августе с пиком в июле, и что почти все личинки в изученных шельфовых районах обитают в верхнем 0,5-метровом слое, то станет ясно, что истощение озонового экрана на 16 % может привести к значительному увеличению их смертности (Häder et al., 1995).

Бентос. В современных исследованиях не обнаружено отрицательного влияния УФ-Б на интенсивность дыхания водорослей-макрофитов и морских трав, однако доказано, что фотосинтез угнетается у многих красных, бурых и зеленых донных водорослей. Сублиторальные водоросли чувствительнее к УФ-Б, чем литоральные (Larkum, Wood, 1993; Maegawa et al., 1993; Häder, Schäfer, 1994). У тропических красных водорослей обнаружено образование пигментов, защищающих растения от повышенной интенсивности УФ-Б (Wood, 1989).

В олиготрофных морских акваториях УФ-Б проникает на глубину нескольких десятков метров и поражает донные организмы (Smith et al., 1992). Кораллы, большинство которых имеют в тканях симбиотические одноклеточные водоросли-зооксантеллы, различаются по толерантности к УФ-Б в зависимости от глубины обитания; с ее увеличением в кораллах уменьшается содержание защитных пигментов – S-320 и микоспориновых аминокислот, поглощающих УФ-Б и защищающих от вредного излучения зооксантеллы хозяина. У колоний *Acropora microphthalma*, перенесенных с глубины 20–30 м на глубину 1 м, фотосинтез симбионтов угнетается на 30–38 %, что обусловлено увеличением интенсивности УФ-Б в верхних слоях воды (Siebeck, Bohm, 1987). Побеление рифообразующих кораллов *Montastrea annularis* у Багамских островов объясняется не увеличением температуры воды, а возросшим уровнем УФ-Б, к которому кораллы не успевают адаптироваться (Gleason, Wellington, 1993). Животные, обитающие на коралловых рифах, – губки, мшанки, оболочники – также повреждаются УФ-Б. Под действием этого излучения нарушается и дробление яиц морских ежей (El Saied, 1988).

Большое экологическое значение имеет поздневесеннее увеличение интенсивности УФ-Б, которое приходится на критические стадии онтогенеза некоторых видов беспозвоночных и сильно увеличивает их смертность.

Полагают, что УФ-Б вызывает у животных окислительный стресс, как показано на актиниях и восьмилучевых кораллах (Häder et al., 1995). Несмотря на то что спектр излучения узок, различные его участки неодинаковы по биологическому действию: коротковолновая часть действует преимущественно на ДНК, длинноволновая – на белки (Израэль и др., 1994). УФ-Б повреждает не одну какую-либо функцию, но имеет много вредных эффектов, различающихся по спектрам действия. Это осложняется антагонистическими и восстановительными процессами, вызванными УФ-Б и видимым излучением.

Биологическая продуктивность. В открытом океане занос вещества из наземных сообществ пренебрежительно мал, а большая глубина препятствует фотосинтезу в бентали. Следова-

но, первичным источником органического вещества в нем фактически является только фитопланктон.

Хорошо известно, что фитопланктон распределен в океане неравномерно: его продукция максимальна в высоких широтах, а в тропиках и субтропиках (за исключением районов апвеллинга на континентальных шельфах и близ экватора) она значительно ниже (Häder et al., 1995). Помимо других факторов, таких, как концентрация нутриентов, освещенность, температура, стабильность водного столба, выедание зоопланктерами, эти различия могут быть обусловлены и УФ-Б, среднегодовая интенсивность которого в низких широтах в несколько раз выше, чем в циркумполярных районах (Häder, 1993). Кроме пространственных различий продукция фитопланктона испытывает и выраженные сезонные изменения. В умеренных водах она достигает максимума весной (иногда бывает второй пик осенью) и ослабляется летом при усилении УФ-Б. Такая картина пространственно-временной вариабельности фитопланктона позволяет предположить, что существенное увеличение интенсивности УФ-Б может оказывать отрицательное влияние на его продукцию. Прямые измерения *in situ* подтверждают эту гипотезу.

Первое веское доказательство отрицательного влияния истощения озонового слоя на сообщества фитопланктона получено в Антарктике. Воспользовавшись пространственной вариабельностью фронта УФ-Б, связанного с полярной озоновой "дырой", исследователи определили продукцию фитопланктона под ней и вне ее (толщина озонового слоя соответственно 150 и 300 ед. Добсона). Первичная продукция под "дырой" оказалась на 6–12 % ниже, чем вне "дыры" (Smith, Baker, 1989; Smith et al., 1992). Эти данные относятся к зоне краевого льда Южного океана; другие оценки снижения первичной продукции, обусловленного возросшей интенсивностью УФ-Б, для различных районов Антарктики варьируют в пределах 6–23 % (Holm-Hansen et al., 1993; Weiler, Penhale, 1994).

В тропических водах УФ-Б также снижает первичную продукцию. При исключении с помощью фильтров большей части УФ-излучения с длиной волны менее 378 нм фотосинтез возрастает на 10–20 %. Фитопланктон под перемешанным слоем чувствительнее к УФ-Б, чем у поверхности моря (Helbling et al., 1992).

В морских водах Северного полушария, как и Южного, отмечено ингибирование фотосинтетической активности фитопланктона. Так, во всех акваториях Берингова и Чукотского морей в августе–сентябре 1993 г. под воздействием УФ-излучения она была на 47–80 % ниже, чем без УФ (Израэль и др., 1994).

Фитопланктон является основой сложных морских пищевых цепей. Следовательно, потеря его продукции из-за влияния УФ-Б неизбежно приводит к падению продукции на следующих, более высоких трофических уровнях, снижая продукцию и промысел рыб (Gucinski et al., 1990). Зависимость вылова морских рыб (y , кг/га в год) от первичной продукции (x , г С/м² в год) описывается уравнением

$$\ln y = 1,55 \ln x - 4,49$$

при коэффициенте корреляции 0,92. Параметры уравнения определены по материалам для нескольких десятков морских акваторий на разных широтах, первичная продукция в которых варьирует от 20 до 500 г С/м² в год (Nixon, 1988). По измерениям, проведенным в 1992–1993 гг. на различных широтах Мирового океана, падение первичной продукции из-за возросшей интенсивности

УФ-Б составляет в среднем 17% (Smith, Baker, 1989; Helbling et al., 1992; Smith et al., 1992; Holm-Hansen et al., 1993; Израэль и др., 1994; Weiler, Penhale, 1994), что приводит согласно уравнению к падению морского рыболовства более чем на 27%. Однако не исключено, что ущерб намного выше, так как уравнение не учитывает повреждения ранних стадий онтогенеза рыб УФ-излучением.

Развитие сообществ. Истощение озонового слоя идет столь быстрыми темпами, что высказывается вполне обоснованное опасение: для генетической адаптации к усилению УФ-Б может не хватить времени (Häder et al., 1995). Это означает, что многие виды исчезнут, состав флоры и фауны радикально изменится, а экосистемы приобретут несвойственный им ныне облик.

При далеко зашедшем процессе истощения озона в первую очередь потерпят ущерб очень мелкие (до 15 мкм) организмы, играющие большую роль в круговороте вещества в океане, что приведет к значительной перестройке морских пищевых сетей (Karentz et al., 1991). Селективное преимущество получают крупные фитопланктоны, почти не имеющие кормового значения. У зоопланктонов, многие из которых питаются ультрапланктоном, значительно уменьшится плотность популяций. В результате упадут районы, скорость роста и численность потребителей зоопланктона, включая пелагических рыб.

Усилится различие продуктивности открытых и прибрежных районов моря; открытые воды океана в еще большей степени можно будет уподобить полупустыне (Уиттекер, 1980). Многие организмы в поисках пищи переместятся из верхних слоев моря в подповерхностные и придонные воды.

УФ-излучение поражает в большей степени гетеротрофные звенья пищевой сети (Bothwell et al., 1994), поэтому нарушится нормальный ход сукцессии, начнется попятное развитие сообществ с частичным их возвращением к уже пройденным этапам.

Падение интенсивности фотосинтеза и первичной продукции в океане вызовет накопление диоксида углерода в атмосфере, развитие парникового эффекта, глобальное потепление климата и подъем уровня моря с огромной потерей населенной человеком

площади Земли (Израэль и др., 1994).

Рассмотренная картина развития биоты океана предполагает сильное истощение озонового экрана, однако мнения специалистов о ее возможности расходятся. Существуют большие сложности в понимании долговременной динамики атмосферы, не позволяющие определенно ответить на вопрос: что является первичным для наблюдаемого истощения озонового слоя – увеличение содержания фреонов в атмосфере по вине человека или естественная долгопериодная изменчивость атмосферной динамики? Если окажется, что преобладает антропогенный фактор, то прогноз истощения озона ввиду долгоживучести фреонов может быть неблагоприятным. Иное дело, если доминирует естественная цикличность, периодичность которой, по разным источникам, варьирует от 2 до 80 лет. Согласно одной из моделей в середине 80-х годов прослеживался глобальный естественный цикл динамики озонового слоя с минимумом содержания озона, постепенной стабилизацией его потерь в последние годы и возможным плавным возвращением к нормальному состоянию (Жадин, 1995). Однако если такой процесс растянется на несколько десятилетий, то неизбежно значительное снижение продуктивности океана. Это можно видеть на примере горных озер, биота которых длительное время находится в условиях повышенного УФ-стресса (Hessen, 1993).

В результате принятия ряда международных соглашений производство озоноразрушающих веществ постепенно сокращается, но темпы сокращения пока незначительны, а финансовые затраты велики. Кроме того, государства не хотят свертывать свои космические и военные программы, наносящие большой ущерб озоновому экрану. Однако уже разработаны эффективные способы восстановления озонового слоя стратосферы, например разрушение фреонов ультразвуком частотой 20 кГц, создание плазмы в нужном месте атмосферы с помощью сверхвысокочастотных генераторов. Хочется верить, что человечеству удастся справиться с этой проблемой и предотвратить длительное развитие биоты океана в условиях УФ-стресса.

