

Благотворная роль активных форм кислорода



Автор статьи: **Воейков Владимир Леонидович**, известный российский биофизик, профессор Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, доктор биологических наук

Основными направлениями исследований лаборатории Биофотоники МГУ, возглавляемой автором являются: окислительно-восстановительные и колебательные процессы в воде. Работа направлена на подтверждение повсеместной роли воды в биохимических и физиологических процессах и исключительной важности ее более глубокого изучения с перспективой обнаружения ранее неизвестных законов природы.

Интерес к активным формам кислорода (АФК) и реакциям с их участием, к антиоксидантам, блокирующим эти реакции, в последнее время быстро растет, поскольку с АФК связывают развитие у человека широкого спектра хронических заболеваний. Но в рамках традиционных представлений биохимии не находит убедительного объяснения необходимость регулярного потребления АФК с воздухом (супероксидный радикал), водой (перекись водорода), пищей (продукты реакции Мейяра) для повышения адаптивных возможностей организма, устойчивости к стрессу, сохранения высокой жизненной активности. Остаются неясными причины высокой терапевтической эффективности таких сильных оксидантов, как озон и перекись водорода при почти полном отсутствии побочных эффектов. При этом почти не обращается внимания на уникальную особенность реакций с участием АФК - их чрезвычайно высокий энергетический выход. Можно предположить, что абсолютная необходимость АФК для жизнедеятельности и их благотворное терапевтическое действие могут объясняться образованием при их реакциях электронно-возбужденных состояний - триггеров всех последующих биоэнергетических процессов. Колебательный режим таких реакций может обуславливать ритмичное протекание биохимических процессов более высокого уровня. Патогенетические эффекты АФК могут тогда объясняться нарушением регуляции как процессов их генерации, так и устранения.

[закреть](#)

Парадоксы кислородного дыхания

Динамика роста научной литературы, посвященной активным формам кислорода (АФК), свободным радикалам, окислительным процессам их участием, говорит о стремительном растущем к ним интересе биологов и медиков. В большинстве публикаций по проблемам, связанным с активными формами кислорода, подчеркивается их деструктивное действие на мембраны, нуклеиновые кислоты и белки. Поскольку в исследованиях роли, которую могут играть АФК в биохимии и физиологии, преобладает токсикологический и патофизиологический уклон, число публикаций, посвященных антиоксидантам, растет даже быстрее, чем общее число статей по АФК. Если за 25 лет до 1990 года число отреферированных в Medline статей по антиоксидантам было менее 4500, то лишь за 1999 и 2000 оно превысило 6000.

В то же время вне поля зрения большинства исследователей остается громадный массив данных, свидетельствующих об абсолютной необходимости АФК для процессов жизнедеятельности. Так, при пониженном содержании в атмосфере супероксидных радикалов животные и человек заболевают, а при длительном их отсутствии гибнут. На производство АФК в норме идет 10-15%, а в особых обстоятельствах - до 30% потребляемого организмом кислорода. Становится ясным, что определенный "фон" АФК необходим для реализации действия на клетки биорегуляторных молекул, а сами АФК могут имитировать действие многих из них. Все более широкое применение находит "окситерапия" - лечение широкого спектра заболеваний путем искусственной аэроионизации воздуха, обработкой крови такими чрезвычайно активными формами кислорода, как озон и перекись водорода.

Таким образом, многочисленные эмпирические данные входят в противоречие со сложившейся в классической биохимии схемой, в рамках которой АФК видятся лишь как сверх-активные химические частицы, которые могут нарушать стройный ход нормальных биохимических

процессов. В то же время не принимается во внимание главная особенность реакций с участием АФК - их чрезвычайно высокий энергетический выход, достаточный для генерации электронно-возбужденных состояний. Но благодаря именно этой особенности они могут формировать своеобразные биоэнергетические потоки, необходимые для запуска, поддержания, и упорядочивания разнообразных биохимических и физиологических процессов. Мы предполагаем, что реакции с участием АФК играют фундаментальную (от слова "фундамент") роль в организации сложнейшей паутины био-физико-химических процессов, которые в совокупности отвечают понятию "живой организм". Для обоснования этого предположения необходимо хотя бы кратко остановиться на уникальных свойствах кислорода и его активных форм.

[заккрыть](#)

Особые свойства молекулы кислорода и продуктов его превращения

Кислород абсолютно необходим для всех организмов, а для жизни человека в особенности. Всего несколько минут без кислорода приводят к необратимому повреждению мозга. Мозг человека, составляющий лишь 2% от массы его тела, потребляет около 20% получаемого организмом кислорода. Считается, что почти весь O_2 потребляется при окислительном фосфорилировании в митохондриях, но их содержание в нервной ткани не больше, если не меньше, чем в других энергозависимых тканях [1]. Следовательно, должен существовать другой путь утилизации O_2 , и мозг должен потреблять его на этом пути активнее, чем другие ткани. Альтернативный окислительному фосфорилированию путь использования O_2 для получения энергии - его одноэлектронное восстановление. Свойства молекулы O_2 в принципе позволяют получать энергию и на этом пути.

Кислород уникален среди важных для жизнедеятельности молекул. Он содержит 2 неспаренных электрона на валентных орбиталях ($M\uparrow\uparrow$, где \uparrow представляет собой электрон с определенным значением спина), т.е. O_2 в своем основном состоянии триплетен. Такие частицы обладают значительно большим запасом энергии, чем молекулы в невозбужденном синглетном состоянии [$M\uparrow\downarrow$], когда все их электроны спарены. O_2 может стать синглетным, только получив немалую порцию энергии. Таким образом, как триплетное, так и синглетное состояния кислорода - это возбужденные, богатые энергией состояния. Избыточная энергия O_2 (180 ккал/моль) освобождается, когда он восстанавливается до 2-х молекул воды, получив с атомами водорода 4 электрона, полностью уравнивающих электронные оболочки обоих атомов O.

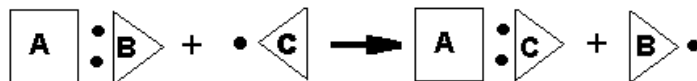
Несмотря на большой избыток энергии, O_2 с трудом реагирует с окисляемыми им веществами. Практически все доступные ему доноры электронов - синглетные молекулы, а прямая реакция триплет-синглет с образованием продуктов в синглетном состоянии невозможна [2]. Если же O_2 тем или иным способом приобретает дополнительный электрон, то последующие он может получить уже легко. На пути одноэлектронного восстановления O_2 и образуются промежуточные соединения, названные АФК, благодаря их высокой химической активности. Получив первый электрон, O_2 превращается в супероксид-анион радикал $O_2^{\cdot-}$. Добавление второго электрона (вместе с двумя протонами) превращает последний в перекись водорода, H_2O_2 [2]. Перекись, не будучи радикалом, а малоустойчивой молекулой, может легко получить третий электрон, превратившись в чрезвычайно активный гидроксил-радикал, HO^{\cdot} , который легко отнимает у любой органической молекулы атом водорода, превращаясь в воду.

Обычная химическая реакция между молекулами АВ и С

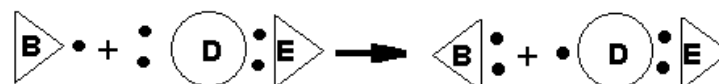


Цепная реакция между молекулами и свободными радикалами

Инициация цепи
радикалом С•



Продолжение цепи



Обрыв цепи



Рисунок 1. В отличие от обычных молекулярных реакций свободные радикалы – частицы с нечетным числом электронов – порождают реакционные цепи, обрывающиеся только при рекомбинации радикалов

Свободные радикалы отличаются от обычных молекул не только высокой химической активностью, но и тем, что порождают цепные реакции. "Отобрав" доступный электрон у оказавшейся рядом молекулы, радикал превращается в молекулу, а донор электрона - в радикал, который может продолжить цепь дальше (рисунок 1). Действительно, когда в растворах биоорганических соединений развиваются свободно-радикальные реакции, немногочисленные исходные свободные радикалы могут вызывать повреждение громадного числа биомолекул. Именно поэтому АФК традиционно рассматриваются в биохимической литературе как чрезвычайно опасные частицы [3], и их появлением в среде организма объясняют многие заболевания и даже видят в них основную причину старения [4].

[закреть](#)

Целенаправленная продукция АФК живыми клетками

Все организмы оснащены разнообразными механизмами для целенаправленной генерации АФК. Давно известен фермент NADPH-оксидаза, активно продуцирующий "токсичный" супероксид, за которым порождается вся гамма АФК. Но до самого последнего времени его считали специфической принадлежностью фагоцитирующих клеток иммунной системы, объясняя необходимость продукции АФК критическими обстоятельствами защиты от патогенных микроорганизмов и вирусов. Сейчас стало ясно, что это фермент вездесущ. Он и подобные ему ферменты найдены в клетках всех трех слоев аорты, в фибробластах, синоцитах, хондроцитах, клетках растений, дрожжей [5], в клетках почки [6], нейронах и астроцитах коры мозга [7]. O_2 продуцируют и другие повсеместно распространенные ферменты: NO-синтаза [8], цитохром P-450 [9], гамма-глутамил-транспептидаза [10], и этот список продолжает расти. Недавно обнаружилось, что все антитела способны продуцировать H_2O_2 , т.е. они также являются генераторами АФК [11]. По некоторым оценкам, даже в покое 10-15% всего потребляемого животными кислорода подвергается одноэлектронному восстановлению [12], а в условиях стресса, когда активность супероксид-генерирующих ферментов резко возрастает, интенсивность восстановления кислорода возрастает еще на 20% [13]. Таким образом, АФК должны играть весьма важную роль в нормальной физиологии.

[закреть](#)

Биорегуляторная роль АФК

Выясняется, что АФК принимают непосредственное участие в формировании разнообразных физиологических ответов клеток на тот или иной молекулярный биорегулятор. Какой конкретно будет реакция клетки - вступит ли она в митотический цикл, пойдет ли в сторону дифференцировки или дедифференцировки, или же в ней активируются гены, запускающие процесс апоптоза, зависит и от конкретного биорегулятора молекулярной природы, действующего на специфические клеточные рецепторы, и от "контекста", в котором действует данный биорегулятор: предыстории клетки и фонового уровня АФК. Последний зависит от соотношения скоростей и способов продукции и устранения этих активных частиц.

На продукцию АФК клетками влияют те же факторы, что регулируют физиологическую активность клеток, в частности, гормоны и цитокины. Разные клетки, составляющие ткань, реагируют на физиологический раздражитель по-разному, но индивидуальные реакции складываются в реакцию ткани, как единого целого. Так, факторы влияющие на активность NADPH-оксидазы хондроцитов [14], остеобластов [15] стимулируют перестройки хрящевой и костной тканей [16]. Активность NADPH-оксидазы фибробластов повышается при их механическом раздражении [17], а на скорость продукции оксидантов стенкой сосудов влияет интенсивность и характер тока по ним крови [18]. Одно из первых событий при оплодотворении сперматозоидом яйцеклетки - резкая активация NADPH-оксидазы обоих партнеров [19]. При подавлении продукции ими АФК нарушается развитие многоклеточного организма [20].

АФК и сами могут имитировать действие многих гормонов и нейромедиаторов. Так, H_2O_2 в низких концентрациях имитирует действие на жировые клетки инсулина, а инсулин стимулирует в них активность NADPH-оксидазы [21]. Антагонисты действия инсулина -- адреналин и его аналоги, ингибируют NADPH-оксидазу жировых клеток, а H_2O_2 подавляет действие глюкагона и адреналина [22]. Существенно, что генерация клетками O_2^- и других АФК предшествует остальным событиям во внутриклеточной информационной цепи [23].

Хотя в организме есть множество источников продукции АФК, для нормальной жизнедеятельности человека и животных необходимо регулярное потребление их извне. Еще А.Л.Чижевский показал, что отрицательно заряженные ионы воздуха необходимы для нормальной жизнедеятельности. Сейчас установлено, что аэроионы Чижевского -это гидратированные радикалы O_2^- [24]. И хотя их концентрация в чистом воздухе ничтожна (сотни штук в $см^3$), но при их отсутствии экспериментальные животные погибают в течение нескольких дней с симптомами удушья. В то же время обогащение воздуха супероксидом до 10^4 частиц/ $см^3$ нормализует давление крови и ее реологию, облегчает оксигенацию тканей, усиливает общую резистентность организма к стрессорным факторам [25]. Другие АФК, например, озон (O^3), H_2O_2 использовались еще в первой трети XX века для лечения разнообразных хронических заболеваний - от рассеянного склероза до неврологических патологий и рака [26]. В настоящее время в общей медицине они применяются редко из-за их предполагаемой токсичности. Тем не менее, в последние годы, особенно в нашей стране озонотерапия становится все популярнее, начинается и применение внутривенных вливаний разбавленных растворов H_2O_2 [27].

Таким образом, становится ясно, что АФК - это универсальные регуляторные агенты [28], факторы, благотворно влияющие на процессы жизнедеятельности от клеточного уровня до уровня целого организма. Но если АФК, в отличие от молекулярных биорегуляторов, не обладают химической специфичностью, как они могут обеспечить тонкую регуляцию клеточных функций?

[закреть](#)

Свободно-радикальные реакции - источники импульсов света

Единственный способ, позволяющий оборвать опасные радикальные цепные реакции, в которые вовлекаются все новые биоорганические молекулы - рекомбинация двух свободных радикалов с образованием устойчивого молекулярного продукта. Но в системе, где концентрация радикалов очень низка, а органических молекул - высока, вероятность встречи двух радикалов ничтожна. Замечательно, что кислород, который порождает свободные радикалы, является чуть ли не

единственным агентом, который может их устранить. Будучи би-радикалом, он обеспечивает размножение моно-радикалов, повышая вероятность их встречи. Если радикал $R\uparrow$ взаимодействует с $O_2\uparrow\downarrow$, возникает пероксильный радикал $ROO\downarrow$. Он может оторвать атом водорода у подходящего донора с превращением его в радикал, сам при этом становясь перекисью. Связь O-O в перекисях сравнительно слаба, и при определенных обстоятельствах она может разорваться, породив 2 новых радикала, $RO\uparrow$ и $HO\downarrow$. Это событие называется запаздывающим (относительно основной цепной реакции) разветвлением цепей. Новые радикалы могут рекомбинировать с другими и оборвать ведомые ими цепи (Рисунок 2).

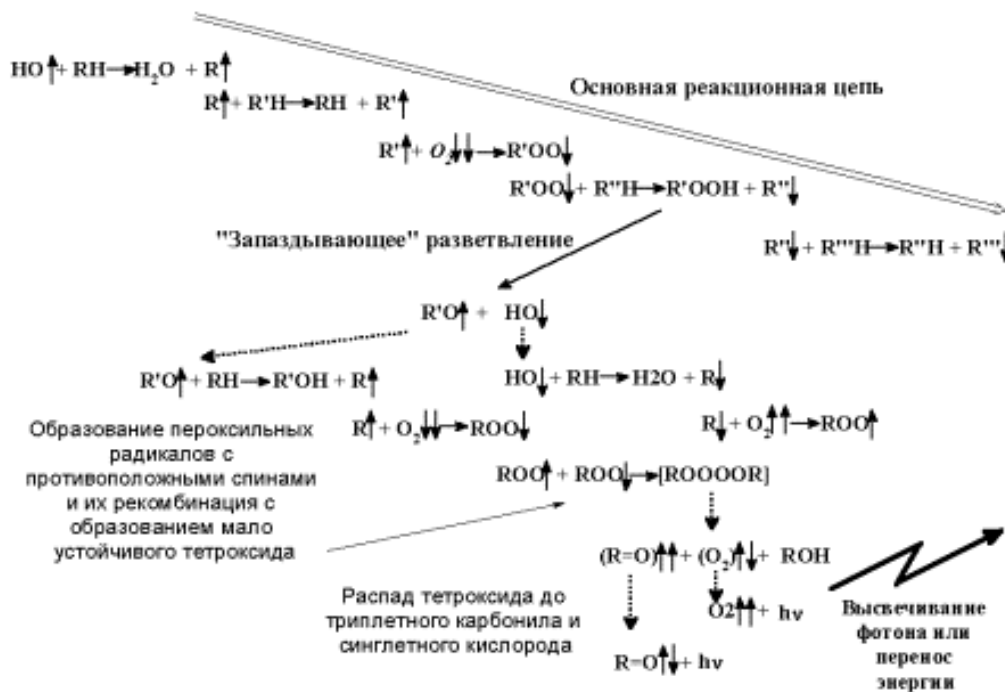


Рисунок 2. Схема цепной реакции с запаздывающими разветвлениями, протекающая в присутствии кислорода. В правой нижней части - электронно-возбужденные продукты реакций рекомбинации радикалов, которые могут высвечивать фотоны при переходе в основное состояние.

И здесь следует подчеркнуть уникальную особенность реакций рекомбинации радикалов: освобождающиеся при таких актах кванты энергии сопоставимы с энергией фотонов видимого и даже УФ-света. Еще в 1938 г. А.Г. Гурвич показал, что в присутствии растворенного в воде кислорода в системе, где протекают цепные свободно-радикальные процессы с участием простых биомолекул, могут испускаться фотоны в УФ-области спектра, способные стимулировать в клеточных популяциях митозы (поэтому такое излучение было названо митогенетическим) [29]. При исследовании инициированных АФК процессов автоокисления в водных растворах глицина или глицина и восстанавливающих сахаров (глюкозы, фруктозы, рибозы) мы наблюдали сверхслабое излучение из них в сине-зеленой области спектра и подтвердили представления Гурвича о разветвленно-цепном характере этих реакций [30].

А.Г. Гурвич первым обнаружил, что растения, дрожжи, микроорганизмы, а также некоторые органы и ткани животных служат источниками митогенетических излучений в "спокойном" состоянии, причем это излучение является строго кислород-зависимым. Из всех тканей животных таким излучением обладали только кровь и нервная ткань. С использованием современной техники детекции фотонов мы полностью подтвердили утверждение Гурвича о способности свежей неразбавленной крови человека быть источником излучения фотонов даже в спокойном состоянии что говорит о непрерывной генерации в крови АФК и рекомбинациях радикалов. При искусственном возбуждении в крови иммунных реакций, интенсивность излучения цельной крови резко возрастает [31]. Недавно было показано, что интенсивность излучения мозга крысы настолько высока, что может детектироваться высокочувствительной аппаратурой даже на целом животном [32].

Как отмечалось выше, заметная часть O_2 в организме человека и животных восстанавливается по одноэлектронному механизму. Но при этом текущие концентрации АФК в клетках и внеклеточном матриксе очень низки из-за высокой активности ферментативных и неферментативных механизмов их устранения, известных в совокупности как "антиоксидантная защита". Некоторые элементы этой защиты действуют с очень высокой скоростью. Так, скорость супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы превышает 10^6 оборотов/сек [33]. СОД катализирует реакцию дисмутации (рекомбинации) двух супероксидных радикалов с образованием H_2O_2 и кислорода, а каталаза разлагает H_2O_2 до кислорода и воды. Обычно обращают внимание лишь на детоксифицирующее действие этих ферментов и низкомолекулярных антиоксидантов - аскорбата, токоферола, глутатиона и др. Но в чем смысл интенсивной генерации АФК, например NADPH-оксидазой, если ее продукты немедленно устраняются СОД и каталазой?

В биохимии обычно энергетика этих реакций не рассматривается, тогда как энергетический выход одного акта дисмутации супероксидов - около 1 эВ, а разложения $H_2O_2 \rightarrow 2$ эВ, что эквивалентно кванту желто-красного света. Вообще, при полном одноэлектронном восстановлении одной молекулы O_2 освобождается 8 эВ (для сравнения укажем, что энергия УФ-фотона с $\lambda=250$ нм равна 5 эВ). При максимальной активности ферментов энергия освобождается с мегагерцовой частотой, что затрудняет ее быстрое рассеяние в виде теплоты. Беспольное рассеяние этой ценной энергии маловероятно еще и потому, что ее генерация происходит в организованной клеточной и внеклеточной среде. Экспериментально установлено, она может излучательно и безизлучательно переноситься на макромолекулы и надмолекулярные ансамбли, и использоваться в качестве энергии активации или для модуляции ферментативной активности [34, 35].

Рекомбинация радикалов, происходящая как при цепных реакциях с запаздывающими разветвлениями (Рис. 2), так и опосредованная ферментативными и неферментативными антиоксидантами не только поставляет энергию высокой плотности для запуска и поддержания более специализированных биохимических процессов. Она может поддерживать их ритмичное протекание, так как в процессах с участием АФК происходит самоорганизация, проявляющаяся в ритмическом освобождении фотонов.

[закрывать](#)

Осцилляторные режимы реакций с участием АФК

Возможность самоорганизации в окислительно-восстановительных модельных реакциях, выражающаяся в появлении осцилляций окислительно-восстановительного потенциала или окраски была давно показана на примере реакций Белоусова-Жаботинского. Известно развитие колебательного режима при катализе пероксидазой окисления кислородом NADH [36]. Однако до последнего времени роль электронно-возбужденных состояний в возникновении этих осцилляций во внимание не принималась. Известно, что в водных растворах карбонильных соединений (например, глюкозы, рибозы, метилглиоксаля) и аминокислот происходит восстановление кислорода, появляются свободные радикалы, и их реакции сопровождаются излучением фотонов. Недавно нами было показано, что в таких системах в близких к физиологическим условиям возникает колебательный режим излучения, что свидетельствует о самоорганизации процесса во времени и пространстве [37, 38]. Существенно, что такие процессы, известные как реакция Мейяра, непрерывно протекают в клетках и неклеточном пространстве [39]. На рисунке 3 показано, что эти колебания не затухают длительное время и могут иметь сложную форму, т.е. представляют собой ярко выраженные нелинейные колебания.

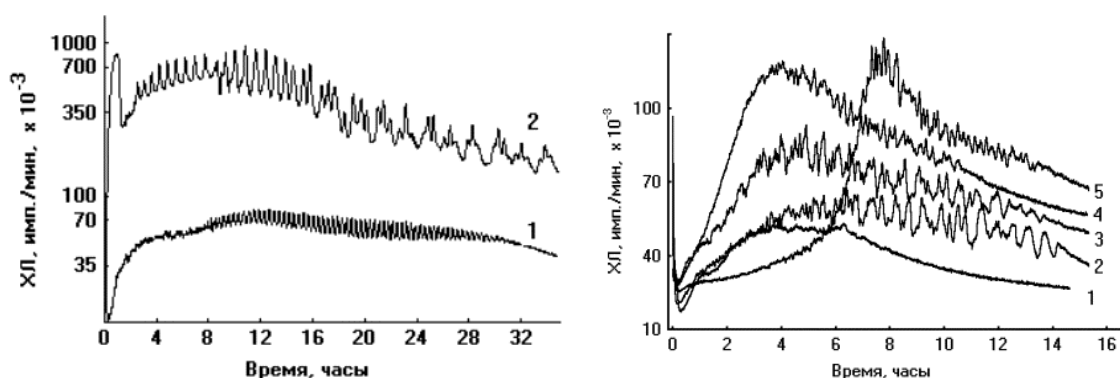


Рисунок 3. Кинетика развития хемилюминесценции в различных реакционных системах: (1) глюкоза-глицин (60 мМ, 60 мМ; 20 мл; pH 11,0) и (2) метилглиоксаль-глицин (10 мМ, 30 мМ; 20 мл; pH 10,6).

Рисунок 4. Влияние аскорбиновой кислоты на хемилюминесценцию в системе глюкоза-глицин (60 мМ, 60 мМ; 10 мл; pH 11,0): (1) - контроль; (2) 1,0 мкМ аскорбата; (3) 10 мкМ аскорбата; (4) 100 мкМ аскорбата; (5) 1000 мкМ аскорбата.

Интересно влияние на характер этих колебаний классических антиоксидантов, например, аскорбата (рисунок 4). Обнаружилось, что в условиях, когда выраженные колебания излучения в системе не возникают, аскорбат в ничтожной концентрации (1 мкМ) способствует их появлению и вплоть до концентрации 100 мкМ резко усиливает общую интенсивность излучения и амплитуду колебаний. Т.е. он ведет себя как типичный прооксидант. Только в концентрации 1 мМ аскорбат выступает в роли антиоксиданта, существенно удлиняя лаг-фазу процесса. Но когда он частично расходуется, интенсивность излучения возрастает до максимальных величин. Такие явления характерны для цепных процессов с вырожденными разветвлениями

Колебательные процессы с участием АФК протекают и на уровне целых клеток и тканей. Так, в индивидуальных гранулоцитах, где АФК генерируются NADPH-оксидазами, вся совокупность этих ферментов "включается" строго на 20 сек, а в следующие 20 сек клетка выполняет другие функции. Интересно, что в клетках из септической крови эта ритмичность существенно нарушена [40]. Мы обнаружили, что колебательные режимы излучения фотонов характерны не только для отдельных клеток, но и для суспензий нейтрофилов (рисунок 5А) и даже для цельной неразведенной крови, к которой добавлен люцигенин -- индикатор генерации в ней супероксидного радикала (рисунок 5В). Существенно, что наблюдаемые колебания носят сложный, многоуровневый характер. Периоды колебаний лежат в диапазоне от десятков минут до их долей (врезка на рис. 5А).

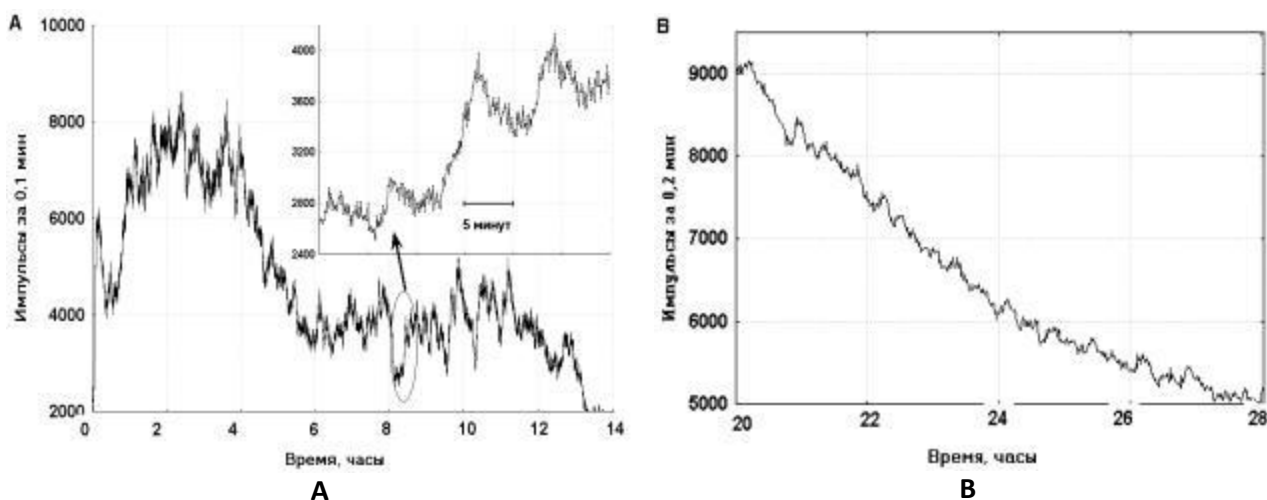


Рисунок 5. А - Осцилляции люминол-зависимого излучения в суспензии нейтрофилов (105 клеток в 0,1 мл) после инициации зимозаном дыхательного взрыва. В - осцилляции излучения в цельной крови человека (0, 2 мл) в присутствии люцигенина.

Значение колебательного характера как регуляторных, так и исполнительных биохимических и физиологических процессов только начинает осознаваться. Совсем недавно было доказано, что внутриклеточная сигнализация, осуществляемая одним из самых важных биорегуляторов - кальцием, обусловлена не просто изменением его концентрации в цитоплазме. Информация заключена в частоте осцилляций его внутриклеточной концентрации [41]. Эти открытия требуют пересмотра представлений о механизмах биологической регуляции. Если до сих пор при изучении реакции клетки на биорегулятор принимали во внимание лишь его дозу (амплитуда сигнала), то становится ясным, что основная информация заключена в колебательном характере изменения параметров, в амплитудных, частотных и фазовых модуляциях колебательных процессов.

Из множества биорегуляторных субстанций АФК являются наиболее подходящими кандидатами на роль триггеров колебательных процессов, потому что они находятся в постоянном движении, точнее - они непрерывно порождаются и погибают, но при их гибели рождаются электронно-возбужденные состояния - импульсы электромагнитной энергии. Мы предполагаем, что механизмы биологического действия АФК определяются структурой процессов, в которых они участвуют. Под "структурой процессов" мы понимаем частотно-амплитудные характеристики и степень фазовой согласованности процессов генерации и релаксации ЭВС, сопровождающих реакции взаимодействия АФК друг с другом или с синглетными молекулами. Порождаемые электромагнитные импульсы могут активировать специфические молекулярные акцепторы, и структура процессов генерации ЭВС определяет ритмы биохимических, а на более высоком уровне и физиологических процессов. Именно этим, вероятно, и объясняется специфичность действия АФК - этих крайне неспецифичных с химической точки зрения агентов. В зависимости от частоты их рождения и гибели структура процессов генерации ЭВС должна меняться, а, значит, и будет меняться и спектр акцепторов этой энергии, поскольку разные акцепторы - низкомолекулярные биорегуляторы, белки, нуклеиновые кислоты могут воспринимать лишь резонансные частоты.

Существенную роль во всех этих процессах играет водная среда, в которой они протекают, поскольку благодаря своим уникальным физико-химическим и динамическим свойствам вода, по видимому, играет не только организующую роль, но и сама принимает участие в продукции и устранении АФК [42].

Наше предположение позволяет с единых позиций объяснить множество разрозненных явлений. Так, роль антиоксидантов видится много богаче, чем в рамках традиционных представлений. Конечно, они предотвращают неспецифические химические реакции повреждения биомакромолекул при избыточной продукции АФК. Но их главная функция - организация и обеспечение разнообразия структур процессов с участием АФК. Чем больше инструментов в таком "оркестре", тем богаче его звучание. Возможно, именно поэтому таким успехом пользуется травотерапия, витаминная терапия и прочие формы натуропатии - ведь эти "пищевые добавки" содержат разнообразные антиоксиданты и коферменты - генераторы и акцепторы энергии ЭВС. Совместно они обеспечивают полноценный и гармоничный набор ритмов жизни.

Становится понятным, зачем для нормальной жизнедеятельности необходимо потребление хотя бы в ничтожных количествах АФК с воздухом, водой и пищей, несмотря на активную генерацию АФК в организме. Дело в том, что полноценные процессы с участием АФК рано или поздно затухают, поскольку при их протекании постепенно накапливаются их ингибиторы - ловушки свободных радикалов. Аналогию здесь можно увидеть с костром, который затухает даже при наличии топлива, если продукты неполного сгорания начинают отбирать все больше энергии пламени. Поступающие в организм АФК выступают в роли "искр", которые вновь разжигают "пламя" - генерацию АФК уже самим организмом, что позволяет дожечь и продукты неполного сгорания. Особенно много таких продуктов накапливается в больном организме, и поэтому столь эффективна озонотерапия и перекисно-водородная терапия.

Ритмы, возникающие при обмене в организме АФК, в той или иной степени зависят и от внешних ритмоводителей. К последним относятся, в частности, колебания внешних электромагнитных и магнитных полей, поскольку реакции с участием АФК - это, по существу, реакции переноса неспаренных электронов, протекающие в активной среде. Такого рода процессы, как следует из современных представлений физики нелинейных автоколебательных систем, весьма чувствительны к очень слабым по интенсивности, но резонансным воздействиям [43]. В частности, процессы с участием АФК могут быть первичными акцепторами резких изменений напряженности геомагнитного поля Земли, так называемых геомагнитных бурь. В той или иной степени они могут реагировать на низкоинтенсивные, но упорядоченные поля современных электронных приборов, в частности, компьютеров и сотовых телефонов. Если ритмика процессов с участием АФК ослаблена и обеднена, подобные внешние воздействия при определенных их характеристиках повышают вероятность разобщения и хаотизации зависящих от генерации электронно-возбужденных состояний биохимических и физиологических процессов.

[закреть](#)

Вместо заключения

Представленный выше анализ эмпирических данных, относящихся к столь "горячей" теме активных форм кислорода и антиоксидантов, привел нас к выводам, в определенной степени противоречащим доминирующим в настоящее время подходам к решению медицинских проблем. Мы не можем исключить, что некоторые из высказанных выше предположений, гипотез не подтвердятся в полной мере при их экспериментальной проверке. Но, тем не менее, мы убеждены, что главный вывод: процессы с участием АФК играют фундаментальную биоэнергоинформационную роль в становлении и осуществлении жизнедеятельности - верен. Безусловно, как и любой другой механизм, тонкий механизм процессов с участием АФК может нарушаться. В частности, одной из главных опасностей для его нормального функционирования может быть недостаток кислорода в среде, где он протекает. И именно тогда начинают развиваться те процессы, которые представляют действительную опасность - распространение цепных радикальных реакций, при которых повреждается множество биологически важных макромолекул. В результате возникают гигантские макромолекулярные химеры, к которым относят атеросклеротические и амилоидные бляшки, старческие пятна (липофусцин), другие склеротические структуры и многие еще слабо идентифицированные балластные, а точнее, токсичные субстанции. Организм борется с ними, интенсифицируя продукцию АФК, но именно в АФК и видят причину патологии и стремятся их немедленно устранить. Можно, однако, надеяться, что более глубокое понимание многообразных механизмов утилизации кислорода человеком и животными поможет эффективно бороться с причинами, а не следствиями заболеваний, которые нередко отражают собственные усилия организма в борьбе за жизнь.

[закреть](#)