

В.К. Евстафьев

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА БИОСФЕРУ ЗЕМЛИ

V.K. Evstafiev

Limnological institute SB RAS, Irkutsk

MECHANISM OF SOLAR ACTIVITY IMPACT ON THE EARTH'S BIOSPHERE

Possible physical mechanism of solar activity influence on Earth molecular processes is presented. It is originated from a well-known fact that weak magnetic fields can selectively influence radical chemical reactions. Excited molecular system has in principle several ways to relax into its ground state in dependence of its electron spin orientation. Magnetic field, changing the electron spin orientation, governs the way the molecular system reaches its ground state. In biological systems, function such biochemical processes as photosynthesis, mitochondrial respiratory chain et cetera. The magnetic field does not bring surplus energy into the system (that clears the kT problem), it only directs a chain of biochemical reactions along a certain path like a pointsman directs a heavy train along one or another rail way.

Проблема влияния солнечной активности на земные процессы волнует умы человечества вот уже два века, с тех пор как в 1804 г. английский астроном Вильям Гершель нашёл корреляцию между числом пятен на Солнце и ценами на зерно в Англии. Он предположил, что солнечные пятна каким-то образом оказывают воздействие на климат на Земле и таким образом влияют на урожай. Но эта догадка, в принципе правильная, в то время была воспринята как некое чудачество престарелого учёного, настолько она казалась невероятной и экзотической. После открытия в середине XIX в. 11-летней цикличности пятнообразовательного процесса и его обусловленности инверсиями магнитных полюсов Солнца начался бум поиска солнечно-земных связей.

К концу века их накопилось столько, что игнорировать влияние Солнца на земные дела стало невозможно – надо было найти этому влиянию какое-то разумное объяснение. Первую гипотезу выдвинул знаменитый шведский химик Сванте Аррениус (1900), основатель современной физической химии. В качестве агента, передающего влияние, он рассматривал электромагнитное поле. Но так как не было при этом предложено какого-то конкретного физического механизма, то его предположение так и осталось гипотезой. Впоследствии, несмотря на многочисленные попытки вплоть до наших дней, желанный физический механизм так и не был найден. Гравитационная версия также не увенчалась успехом [Хлыстов и др., 1992; Горшков, 1992]. Хотя было понятно, что причина кроется в энергии, поступающей от небесного светила к нам на Землю. Ее интегральный поток – величина столь постоянная ($1360 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \pm 0.2 \%$, от-

сюда и была названа солнечной постоянной), что колебаниями количества поступающей энергии объяснить явление было невозможно. Попытки привлечь к рассмотрению низкочастотную часть спектра излучения Солнца, в которой действительно наблюдаются значительные изменения в 11-летнем цикле, наткнулись на проблему кТ. Это основное возражение скептиков против влияния слабых воздействий, энергия которых много меньше кТ, на молекулярные системы, в силу известных термодинамических соображений. Некоторые исследователи, например, И.М. Дмитриевский [1992, 2001], А.Б. Узденский [2000] и др., пытались преодолеть эту трудность посредством построения всякого рода резонансных моделей. Однако ни одна из них не стала общепринятой. В модели ядерного магнитного резонанса, предложенной И.М. Дмитриевским, разность заселённости спиновых состояний, расщеплённых в земном магнитном поле, как выяснилось, не может обеспечить нужную интенсивность поляризованного излучения.

Другой подход основан на идее метастабильных состояний, находящихся в неустойчивом равновесии. Л.Д. Кисловский [1971] выдвинул гипотезу о том, что в водных растворах имеет место конкурентная гидратация ионов Ca^{+2} , играющих важную регуляторную роль в клетках, между тетраэдрической $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})^{4+2}$ и октаэдрической $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})^{6+2}$ формами. Несмотря на то что октаэдрическая форма энергетически выгоднее, в разбавленных растворах сеть водородных связей способствует тетраэдрической координации. Он предположил, по аналогии с газогидратами, что возможна метастабильная $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})^{6+2}$ в полостях воды, которая при определённых условиях нарушается, и происходит лавинообразный переход $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})^{6+2} \rightarrow \text{Ca}(\text{H}_2\text{O})^{4+2}$, сопровождающийся изменениями физико-химических свойств раствора с соответствующим биологическим эффектом.

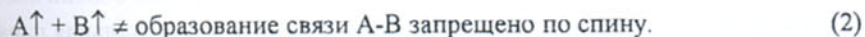
В нашей работе предлагается механизм, посредством которого слабые магнитные поля могут вмешиваться в ход молекулярных процессов, намного превосходящих их по энергии. Автор не претендует при этом на оригинальность своей идеи, она давным-давно витает в воздухе и опубликована, как минимум, четверть века назад в книге [Бучаченко и др., 1978], а также изложена в обзорной статье [Зельдович и др., 1988] и других работах (например, [Головин, Моргунов, 2002]). Другое дело, что применительно к биологическим проблемам она детально не рассматривалась, ограничиваясь лишь постулированием такой возможности.

Возбужденные состояния и их релаксация в основное состояние

Один из базовых принципов физики гласит, что любая молекулярная система стремится к минимуму потенциальной энергии. Однако в таком состоянии она может

находиться, только будучи совершенно изолированной от поступления энергии извне. Вследствие взаимодействия с окружающей средой молекулы и молекулярные ансамбли переходят в возбужденные состояния, откуда вновь релаксируют в основное, излучая лишнюю энергию либо обращая ее в тепло. Существенно, что путей возвращения в исходное состояние может быть несколько, и в этом ключ решения проблемы влияния слабых воздействий на процессы, многократно превосходящие их по энергии. Представим себе механическую аналогию: конус, ориентированный вертикально, с чуть срезанной плоской вершиной, на которой покоится шар. Система, как видим, находится в состоянии неустойчивого равновесия. Небольшого толчка достаточно, чтобы оно нарушилось и шар скатился вниз. Причем в зависимости от направления толчка конечное состояние оказывается разным. В химических и биохимических системах, оказавшихся в состоянии неустойчивого равновесия либо в возбужденном состоянии без локального потенциального минимума, движение в основное состояние или в одно из нижележащих метастабильных может происходить через разные цепочки связанных химических превращений. Выбор той или иной цепочки реализуется первой реакцией или элементарным актом, остальные следуют уже, как поезд за локомотивом.

Влияние магнитного поля на кинетические параметры парамагнитных газов впервые замечено в 1913 г.: время жизни фосфоресцентного состояния $B(^3\Pi_{0u})$ молекулы йода сокращалось почти вдвое при наложении магнитного поля напряженностью 15 кЭ [Зельдович и др., 1988]. Но его влияние на химические реакции было обнаружено сравнительно недавно, в 1960-х годах, благодаря открытию явления химической поляризации ядер и электронов [Bargon et al., 1967]. Это направление, а именно - изучение магнитных эффектов в радикальных реакциях, затем получило сильное развитие в Новосибирском научном центре в 1970-х годах. Выяснилось, что магнитные поля, энергия которых составляет всего сотысячную долю тепловой, способны эффективно перемешивать синглетный и триплетный термы [Бучаченко и др., 1978] и определять таким образом путь релаксации радикальной пары. Обнаружился целый класс спин-зависимых химических реакций. Существует множество переходов в атомах и молекулах, запрещенных по спину; например, две частицы со спином $\frac{1}{2}$ могут образовать химическую связь в большинстве случаев только в синглетном состоянии, т.е. когда спины ориентированы антипараллельно (иногда, когда пара электронов заселяет вырожденные молекулярные орбитали, это условие не обязательно):

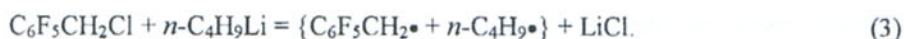


Появляется возможность с помощью магнитного поля, поворачивая спины неспаренных электронов в химических системах и накладывая таким способом запрет на те или иные элементарные акты, регулировать релаксацию системы в нужном направлении. Причем мы практически не вносим в нее дополнительную энергию. Спиновые состояния здесь уподобляются стрелочнику, направляющему тяжелый груженный состав по тому или иному пути.

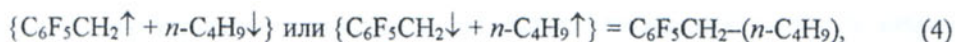
Влияние солнечной активности на молекулярные системы

Влияние солнечной активности на земные молекулярные процессы сводится, исходя из вышеизложенного, к воздействию генерируемых ею магнитных бурь в магнитном поле Земли и низкочастотного излучения на спиновые состояния возбужденных молекулярных систем. Во время вспышек на Солнце из пятен вырываются магнитные силовые потоки, которые увлекают за собой плазму, и она с огромными скоростями (до 500 км/с) разлетается в окружающее пространство. Сталкиваясь с магнитным полем Земли, заряженные частицы возмущают его - эти возмущения нам хорошо известны как магнитные бури. Закручиваясь вдоль силовых линий, они на полюсах вторгаются в атмосферу и вызывают полярное сияние. Во время магнитных бурь многие жалуются на головные боли, увеличивается число психических расстройств, нарушается радиосвязь и т.д. [Чижевский, 1976]. Наиболее чувствительны к ним люди больные и пожилого возраста, т.е. утратившие защитные механизмы, которые неизбежно должны были выработаться в ходе эволюции. Надо полагать, магнитные бури дестабилизируют тонкие биохимические системы путем воздействия на их спиновые состояния.

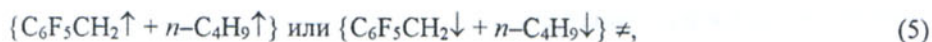
Первой химической реакцией в жидкой фазе, на которой достоверно установлено влияние магнитного поля, была реакция между пентафторбензилхлоридом и бутиллитием [Сагдеев, Лешина и др., 1972; Сагдеев, Салихов и др., 1972; Бучаченко и др., 1978]:



У образовавшейся радикальной пары дальнейшая судьба зависит от того, в каком состоянии находятся спины: если в синглетном



то происходит ее рекомбинация с образованием пентафторфенил-*n*-пентана; если в триплетном



то образование химической связи запрещено по спину, и радикальная пара распадается



Далее, после соответствующей инверсии спинов и рекомбинации, образуются дипентафторбензил



пентафторфенил-н-пентан



и н-октан



в соотношении, определяемом теорией вероятности. Магнитное поле подавляет синглет-триплетную конверсию и соответственно уменьшает выход продуктов вторичной рекомбинации радикалов. Поле в 15 кЭ уменьшало выход на 30–40 % [Сагдеев, Лешина и др., 1972; Сагдеев, Салихов и др., 1972; Бучаченко и др., 1978].

После этого открытия выглядело привлекательным объяснить биологические эффекты солнечной активности ее воздействием на фотосинтез. Было изучено влияние магнитного поля на первичные процессы возбуждения хлорофиллового комплекса, разделения зарядов и электронного транспорта по цепочке акцепторов к молекуле [Бучаченко и др., 1978; Зельдович и др., 1988]. Оказалось, что радикальные пары никотинамидадениндинуклеотидфосфата (НАДФ) играют существенную роль в синглет-триплетном переходе в реакционных центрах фотосинтезирующих бактерий, например *Rhodospseudomonas sphaeroides*. Небольшие, около 30 Э, поля насыщения эффекта свидетельствовали о том, что механизм смешивания синглетных и триплетных состояний имеет природу сверхтонкого взаимодействия. В этом направлении сделано достаточно много работ (они изложены в обзоре [Зельдович и др., 1988]), которые однозначно свидетельствуют о том, что магнитные поля оказывают влияние на процесс фотосинтеза.

Земное магнитное поле ~1 Э на порядок слабее тех полей, при которых было зарегистрировано их влияние на химические реакции в лабораторных экспериментах, однако замечено, что напряженность этих полей сильно зависит от длины цепи химических превращений [Бучаченко и др., 1978; Зельдович и др., 1988]. Например, в цепных радикальных реакциях эффект магнитных полей порядка 100 Э составлял сотни процентов. Увеличение вязкости растворов также уменьшало величину поля примерно на 50 %. Кроме того, один из основных принципов электродинамики гласит, что магнитное поле работы не совершает, оно лишь трансформирует один вид энергии в другой. Постоянное магнитное поле расщепляет молекулярные уровни (эффект Зеемана), а инверсия спинов происходит при резонансном поглощении или, наоборот, излучении фо-

тонов с соответствующей ларморовой частотой конкретного электрона в конкретной молекуле. Другими словами, перенос энергии в молекулярных процессах производится не магнитным полем, а электромагнитным с подходящей частотой. На основе огромного экспериментального материала [Головин, Моргунов, 2002] показано, что резонансное электромагнитное поглощение твердыми телами в постоянных магнитных полях, на много порядков меньших, чем требует равновесная термодинамика – условие kT , приводит к изменению их пластичности. В земном магнитном поле эти резонансные частоты составляют ~ 1 МГц, т.е. лежат в области средних радиоволн, в море которых купается наша цивилизация. Не отсюда ли некоторые техногенные катастрофы, вызванные потерей прочности конструкционных материалов?

В биологических системах достаточно много частиц с одним или несколькими неспаренными спинами. Первый кандидат на активную биохимическую роль – молекула кислорода O_2 , которая, как известно, парамагнитна и имеет в основном состоянии два неспаренных электрона на вырожденных разрыхляющих π -молекулярных орбиталях. Инверсия спина одного из этих электронов переводит молекулу O_2 в возбужденное синглетное состояние, в котором она химически очень активна. О роли этого так называемого синглетного кислорода в современной биохимической литературе пишется много. Остановимся на обобщающей публикации академика В.П. Скулачева в журнале "Природа" [1998], где он, анализируя эволюционную стратегию живых систем, рассказывает о r - и K -стратегиях популяций и показывает, что к первой они прибегают при неблагоприятно складывающихся условиях среды обитания и переходят ко второй – в благоприятных.

Организмы r -популяций характеризуются быстрым обменом веществ, быстрым темпом размножения и короткой продолжительностью жизни, что способствует ускоренной эволюции. Когда ситуация стабилизируется и жизнь нормализуется, популяции переходят к K -стратегии, при которой скорость размножения падает, продолжительность жизни увеличивается. Совсем недавно выяснилось, что регулятором темпа обмена веществ в клетках является белок теплового шока с молекулярной массой около 70 кД, получивший название mHsp70 (Moore A. Report at 10th European Bioenergetic Conference, Göteborg, Sweden, June 27th – July 2nd 1998, устное сообщение). Он лимитирует работу митохондрий. При их слишком сильной активности ускоряются процессы дыхания в клетке, но взамен как побочный эффект образуются активные формы кислорода – радикалы $HO_2\bullet$ и $HO\bullet$, окисляющие любые встречающиеся на их пути молекулы, в

том числе ДНК. Увеличивается количество мутаций, какая-то их часть улучшает приспособленность организма к изменившимся условиям среды обитания и посредством механизма естественного отбора закрепляется в геноме.

Усиление дыхания клетки является ответом на неблагоприятные внешние воздействия. При этом около 2 % потребляемого кислорода по каким-то причинам превращается в активные его формы – факт удивительный, если учесть, что биохимические реакции, контролируемые высокоспецифичными ферментативными системами, как правило, идут практически нацело. А тут целых 2 % брака! Скорее всего, причина в том, что нарушение нормального хода окислительного процесса происходит при инверсии спина молекулы кислорода. Установлено, что сбои происходят в начале и середине дыхательной цепи. Можно предположить следующий сценарий. Флуктуация магнитного поля, вызванная магнитной бурей, переворачивает спин молекулы кислорода, связанной ферментом в молекулярный комплекс. Для этого даже не обязательно резонансное поглощение фотона, источником энергии могут служить тепловые колебания. Кислород активизируется, хватает первый "попавший под руку" атом водорода, превращаясь в $\text{HO}_2\bullet$, "разрывает пути", вырывается из комплекса и начинает "дебоширить" в клетке. Для исправления повреждений клеткой вызывается ремонтная бригада – белки mHsp70. Биохимические процессы в клетке ускоряются. Факт увеличения химической активности кислорода в годы высокой солнечной активности экспериментально установил В.В. Соколовский [1982], на примере реакции окисления тиоловых соединений.

Недавно стало известно [Lakomski, Hekimi, 1996] о двух генах, получивших название геронтогенов, один из которых кодирует синтез белка, который, в свою очередь, включает другой ген, ответственный за синтез кофермента КоQ, семихинонная форма которого служит восстановителем кислорода до $\text{HO}_2\bullet$. Т.е. клетка сама вырабатывает активные формы кислорода! Полагаю, что это связано с жизненными циклами генераций организмов. Известны наблюдения массового размножения некоторых насекомых, циклов леммингов, мелозирных годов весеннего фитопланктона в озере Байкал и других подобного рода явлений. Для многих из них доказана связь с 11-летними циклами солнечной активности, например байкальский фитопланктон дает вспышки численности, как правило, через каждые 3 и 4 года. Причем три такие "вспышки" укладываются в отрезок времени длиной 11 лет [Евстафьев, Бондаренко, 2000].

Подробное объяснение этого явления не входит в тему статьи. Поэтому ограничусь здесь лишь утверждением, что, коль скоро повышение уровня активных форм кислорода в наибольшей степени происходит на пике солнечной активности, то длину

жизненного цикла популяциям логично было бы совместить с длиной солнечных циклов, чтобы собственная фаза выработки активных форм кислорода совпала с повышением их концентрации вследствие воздействия магнитных бурь. Если жизненный цикл короткий, то его длину популяции должны были настроить в ходе эволюции так, чтобы она целочисленно укладывалась в длину солнечной активности, что мы и наблюдаем для весеннего байкальского фитопланктона.

Заключение

Предложенная схема не претендует на исчерпывающее объяснение механизма влияния солнечной активности на молекулярные, в том числе и биологические, процессы на Земле. Совместно с исследователями, процитированными выше, мы пока лишь нащупали канал, по которому флуктуации магнитных полей как космического, так и техногенного происхождения оказывают воздействие на спиновые состояния молекулярных систем [Evstafyev, 2003], которые, в свою очередь, играют решающую роль в процессах релаксации из возбуждённого состояния в основное или одно из нижележащих метастабильных. Предполагается, что влияние солнечной активности на живые объекты происходит не через фотосинтез, где кислород появляется как конечный продукт и не может влиять на выбор пути процесса, а через дыхательную цепь в митохондриях, где он – один из начальных реагентов; соответственно, инверсия его спина может направлять цепочку биохимических превращений по тому или иному руслу. К тому же фотосинтез присущ лишь растениям, между тем как биологический эффект солнечной активности проявляется и в животном царстве. Кислород находится повсюду на поверхности нашей планеты – в атмосфере, толще океанских вод, байкальских глубинах, в других природных водах. Отсюда – всеобъемлющий характер проявлений солнечной активности не только в живых объектах, но и в физико-химических молекулярных процессах.

Библиографический список

- Аррениус С. Влияние космических условий на физиологические отправления // Научное обозрение. – 1900. – № 2. – С. 261–268.
- Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. – Новосибирск: Наука, 1978. – 296 с.
- Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магниторезонансное разупрочнение кристаллов // Природа. – 2002. – № 8. – С. 49–57.
- Горшков М.М. Планеты, Солнце и биосфера // Биофизика. – 1992. – Т. 37, № 4. – С. 805–816.

Дмитриевский И.М. Космофизические корреляции в живой и неживой природе как проявление слабых воздействий // Биофизика. – 1992. – Т. 37, № 4. – С. 674–680.

Дмитриевский И.М. Возможное объяснение феномена космофизических макрофлуктуаций // Биофизика. – 2001. – Т. 46, № 5. – С. 852–855.

Евстафьев В.К., Бондаренко Н.А. Модель "стоячих волн" многолетней динамики байкальского фитопланктона // Биофизика. – 2000. – Т. 45, № 6. – С. 1089–1095.

Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л. Магнитно-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике // Успехи физических наук. – 1988. – Т. 155, № 1. – С. 3–45.

Кисловский Л.Д. О возможном молекулярном механизме влияния солнечной активности на процессы в биосфере // Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. – М.: Наука, 1971. – С. 147–164.

Сагдеев Р.З., Лешина Т.В., Камха М.А. и др. Влияние магнитного поля на соотношение продуктов реакции пентафторбензилхлорида с $n\text{-C}_4\text{H}_9\text{Li}$ // Изв. АН СССР. Серия химическая. – 1972. – № 9. – С. 2128–2129.

Сагдеев Р.З., Салихов К.М., Лешина Т.В. и др. Влияние магнитного поля на радикальные реакции // Письма в ЖЭТФ. – 1972. – Т. 16, № 11. – С. 599–602.

Скулачев В.П. Стратегии эволюции и кислород // Природа. – 1998. – № 12. – С. 11–20.

Соколовский В.В. Ускорение окисления тиоловых соединений при возрастании солнечной активности // Проблемы космической биологии. – 1982. – № 43. – С. 194–196.

Узденский А.Б. О биологическом действии сверхнизкочастотных магнитных полей: резонансные механизмы и их реализация в клетке // Биофизика. – 2000. – Т. 45, № 5. – С. 888–893.

Хлыстов А.И., Долгачёв В.П., Доможилова Л.М. Барическое движение Солнца и солнечно-земные связи // Биофизика. – 1992. – Т. 37, № 3. – С. 547–553.

Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. – М.: Мысль, 1976. – 363 с.

Bargon J., Fischer H., Johnsen U. Kernresonanz-Emissionslinien während rascher Radikal-Reaktionen. I Aufnahmeverfahren und Beispiele // Zeitschrift für Naturforschung. – 1967. – № 22a. – S. 1551–1555.

Evstafyev V.K. A possible way of the solar activity influence on biological processes, and thaw water effect // Berliner Paläobiologische Abhandlungen. – 2003. – vol.4. – P. 105–110.

Lakowski B., Hekimi S. Determination of life-span in *Caenorhabditis elegans* by four clock genes // Science. – 1996. – Vol. 272. – P. 1010–1013.