



# ЦУНАМИ В БЕЛКОВОЙ МОЛЕКУЛЕ

«Цунами – равнодушная волна»

**В. Высоцкий**

*Современные биологию и медицину трудно представить без тесного взаимодействия с точными науками: математикой, физикой, химией. Результатом такого сотрудничества стали впечатляющие открытия в области молекулярной биологии, генной инженерии, нейрофизиологии. В этом очерке речь пойдет об одном из ярких и драматических примеров проникновения новейших идей и методов физики в науки, традиционно изучающие Живое.*

Всё начиналось с, казалось бы, частной проблемы биоэнергетики – раздела биологии, изучающего механизмы превращения энергии в процессе жизнедеятельности организмов.

Хорошо известно, что энергетической валютной на клеточном уровне выступает молекула аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ). Необходимая для живых клеток энергия запасается благодаря синтезу, а освобождается – благодаря гидролизу АТФ. Соответствующие биохимические реакции давно изучены и не вызывают особых вопросов, за исключением одного: **каким образом энергия, освобождаясь в пункте А в результате гидролиза молекулы АТФ, достигает конечного пункта Б, где эта энергия расходуется с пользой для клетки?**



А.С. ДАВЫДОВ (1912–1993)

Расстояние между пунктами А и Б по молекулярным масштабам немалое – десятки ангстрем (напомним, что  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ). Правда, пункты А и Б соединяет белковая молекула, поэтому основная проблема состоит в том, чтобы объяснить, каким образом энергия транспортируется вдоль этой молекулы практически без потерь.

Вот тут и возникли у разработчиков биомолекулярных моделей непреодолимые препятствия. Оказалось, что известные механизмы транспорта энергии, например, с помощью возбуждения упругих колебаний, не работают из-за низкой эффективности передачи, поскольку такие колебания возбуждают всю молекулу в целом. Энергия колебаний очень скоро

«рассасывается» и не достигает конечного пункта. Транспортировка энергии по молекуле с помощью возбуждения электронных состояний, аналогично фотобиологическим процессам (фотосинтезу, зрительной рецепции), также невозможна, поскольку энергии гидролиза АТФ для этого не хватает.

Проблема не давала покоя и даже раздражала учёных неуловимостью решения при чрезвычайной простоте формулировки. Дошло до того, что в 70-е годы XX века на заседаниях международных биофизических конгрессов на повестку дня неоднократно выносился вопрос о «кризисе в биоэнергетике».

«Кризиса» удалось избежать благодаря физикам-теоретикам, которые взяли помочь коллегам-биофизикам. Важно отметить, что ключевая идея, объясняющая механизмы транспорта энергии в биомолекулярных системах, принадлежит советскому учёному, нашему выдающемуся соотечественнику – академику **Александру Сергеевичу Давыдову**. Именно он предложил учитывать нелинейные свойства биологической среды, в которой распространяются колебательные возбуждения, а также ввёл в научный лексикон несколько парадоксальное понятие «**биологический солитон**».

Сам термин «*солитон*» происходит от английского слова *Solitary wave* – «уединенная или изолированная волна» и используется для опреде-

ления необычных физических объектов, самый известный из которых – **цунами** – гигантские волны, образующиеся на поверхности океанов после землетрясений. На жителей прибрежных посёлков это явление издавна наводило ужас своими катастрофическими разрушительными последствиями и какой-то мистической неотвратимостью. Так, было замечено, что эта волна может пройти много сотен километров от эпицентра землетрясения до берега, несколько не уменьшаясь в размерах, и нанося колоссальный вред.

Солитон, как физическое явление, был открыт в 1834 г. английским инженером **Скоттом Расселом**. Интересно, что к открытию его подтолкнуло наблюдение также своеобразного цунами, но «рукотворного» и достаточно миниатюрного: то была одиночная волна, вынырнувшая из-под баржи, которую тянули кони по узкому каналу предместья Эдинбурга.

С. Рассел описал необычные свойства этих объектов, которые назвал «волнами трансляции». С течением времени они не уменьшались по высоте, хотя по неглубокому каналу двигались достаточно медленно, так что их мог сопровождать всадник. Высокие волны двигались быстрее низких, при встрече они не взаимодействовали – просто проходили насквозь – одна через другую. Кони тратили наименьшие усилия для буксировки баржи, если её скорость совпадала со скоростью «волны трансляции».

Публикации С. Рассела стимулировали теоретические исследования, и впоследствии было записано дифференциальное уравнение, которое имело решение в виде локализованного горба, распространяющегося с постоянной скоростью по поверхности воды в неглубоком канале прямоугольного сечения. Оказалось, что *Расселовская «волна трансляции»* может

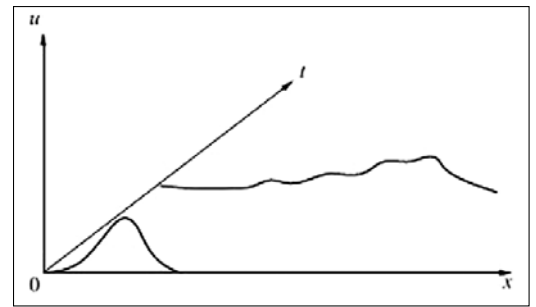
образоваться и двигаться, не теряя энергии, благодаря нелинейным свойствам среды. В линейной среде уединённая волна также может образоваться, но она не способна долго существовать, а быстро расплывётся.

Из высшей математики известно, что волновое возмущение любой формы можно представить как бесконечную сумму гармонических волн, поэтому изолированную волну ещё называют «**волновым пакетом**». Благодаря явлению дисперсии каждая гармоническая составляющая имеет свою собственную скорость распространения в среде, и, следовательно, «волновой пакет» со временем теряет свою первичную форму (рис. 1а).

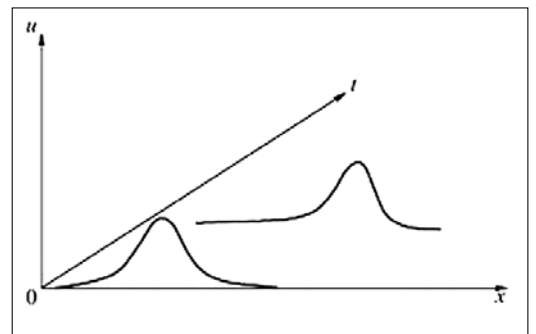
В нелинейной среде скорость распространения зависит ещё и от амплитуды гармонической составляющей. Возможна ситуация, когда «расплывание» за счёт дисперсии будет компенсироваться «стягиванием» из-за нелинейности. Тогда «волновой пакет» распространяется без изменения своей формы (рис. 1б). В дальнейшем, нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее *Расселовскую «волну трансляции»*, оказалось применимо для описания других нелинейных явлений в физике и технике.

Численные расчёты, выполненные в 50-х годах XX века на первых электронно-вычислительных машинах, показали, что уединённые волны могут возникать в нелинейных молекулярных цепях, и тогда упругие возмущения передаются из одного конца к другому практически без потерь энергии. Именно тогда «*солитон*» получил своё название – по аналогии с другими известными *квантиками* – *фононами*, *экситонами*, *поляритонами*.

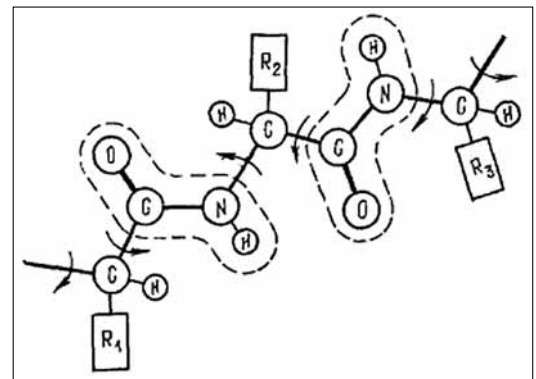
Собственно, результаты компьютерных экспериментов и побудили А.С. Давыдова высказать предположение о том, что ключевую роль в передаче энергии по биомолекулам играют



**Рис. 1а.** Расплывание волнового пакета вследствие дисперсии ( $u$  – смещение частиц от положения равновесия,  $x$  – пространственная координата,  $t$  – время).



**Рис. 1б.** Сохранение профиля уединённой волны, обусловленное взаимной компенсацией явлений дисперсии и нелинейности



**Рис. 2.** Участок молекулы белка. Пептидная группа обведена штриховой линией.  $R_i$  – боковые группы аминокислот

уединённые волны – солитоны, своего рода молекулярные цунами.

Молекула белка является полимером, построенным из ограниченного набора аминокислот. Те, в свою очередь, связаны одна с другой так называемой пептидной связью, которую формирует мостик  $O=C-N-H$ . Фактически, молекула белка – это длинная

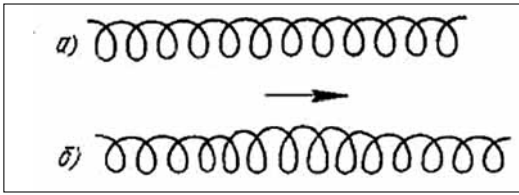


Рис. 3. а) Невозбужденная спиральная молекула белка; б) возбуждение в молекуле солитона

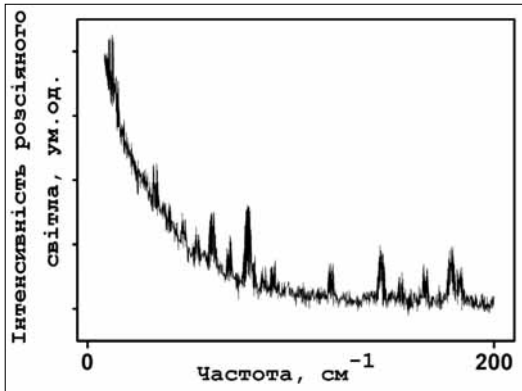


Рис. 4. Спектр комбинационного рассеяния света живых клеток. Частота отсчитывается от линии лазерного возбуждения (из статьи С. Вебба в *Physical Reports* за 1980 г.)

цепь однотипных пептидных звеньев (рис. 2). Каждая пептидная группа может поворачиваться вокруг одиночных связей с соседними атомами углерода. На рис. 2 такие повороты указаны стрелками. Возможность поворотов обуславливает значительную гибкость длинной белковой цепи, что позволяет ей приобретать различные пространственные конфигурации, в частности, закручиваться в правильную правую спираль. Расчёты показывают, что некоторые типы колебаний пептидной связи могут сформировать солитоны, которые распространяются в виде локальных возмущений витков спирали (рис. 3).

Идеи А.С. Давыдова нашли активную поддержку в учёном мире, и в 70–80-х годах XX века было проведено множество компьютерных расчётов, подтвердивших правильность предположений киевского физика.

Но, какими бы исчерпывающими и красноречивыми модельные расчёты не были, ре-

шающим подтверждением любой теории является, конечно же, живой эксперимент. В этом смысле, однако, высказывались сомнения: солитоны – объекты весьма деликатные, уязвимые, в эксперименте могут не проявиться, и каким образом заставить их перемещаться по белку?

Помощь пришла совсем с другой стороны, откуда её совсем не ждали. Поэтому, оставим на некоторое время солитоны и обратимся к биологической когерентности **Герберта Фрелиха**, о которой шла речь в № 4 журнала «Страна знаний» за 2008 год. Напомним, что в рамках этой концепции живая клетка в состоянии активного метаболизма образует гигантский колеблющийся диполь, способный излучать и принимать из внешней среды электромагнитные волны. Гипотезу Г.Фрелиха неоднократно пытались проверить экспериментально.

Канадский биофизик **Сидней Вебб** взял на вооружение метод комбинационного рассеяния света, широко применяющийся в исследованиях колебательных спектров молекулярных систем. Идея этого метода состоит в следующем. Если на образец направить монохроматическое лазерное излучение определённой частоты, то спектр рассеянного под углом  $90^\circ$  света будет содержать, помимо частоты лазерного излучения, ещё и так называемые «комбинационные частоты», отвечающие колебаниям молекул. С.Вебб рассуждал так: если активная клетка – это гигантский колеблющийся диполь, то эти колебания должны проявиться на фоне молекулярных.

Канадскому учёному пришлось преодолеть немалые экспериментальные сложности, поскольку мутноватая суспензия живых клеток мало напоминает обычные кристаллы или прозрачные жидкости. Однако, результаты проведенных опытов

превзошли самые оптимистические ожидания.

В спектре рассеянного живыми клетками света была зафиксирована целая серия узких линий, не соответствующих ни одному из известных молекулярных колебаний (рис. 4). С.Вебба даже удалось зарегистрировать расщепление спектральных линий в клетках злокачественных образований, что согласовалось с умозрительными предположениями Г.Фрелиха.

Позднее, аналогичные спектры комбинационного рассеяния света живых клеток наблюдали и другие исследователи, в частности, группа киевских физиков во главе с академиком **М.П. Лисицей**. Считалось, что концепция Г.Фрелиха получила существенное экспериментальное подтверждение. А к чему же тогда биологические солитоны?

Одному из физиков-теоретиков, выполнявшему компьютерные расчёты солитонов в молекулах белка, случайно попала на глаза статья С.Вебба «Комбинационное рассеяние света живых клеток», судя по названию, чисто биофизической направленности. Как вдруг его внимание привлёк ряд чисел, отображающих комбинационные частоты гипотетического клеточного осциллятора. Учёный был поражён: практически те же значения он получил в собственных расчётах! Чтобы стала понятной реакция исследователя, приведём сравнительную таблицу (в спектрах комбинационного рассеяния света частота колебаний, обычно, выражается в волновых числах) (см. табл.).

Это совпадение, которое позднее называли «разительным», «невероятным» и даже «фантастическим», убедительно доказывало, что биологические солитоны играют фундаментальную роль в процессах жизнедеятельности. Идеи А.С.Давыдова торжествовали!

А как же быть с биологической когерентностью Г.Фрелиха? Получается, что экспери-

	Частота, см <sup>-1</sup>								
Теория	34	51	68	85	91	108	125	159	176
Эксперимент	45	52	63	85	90	108	123	152	182

менты С.Вебба подтверждают совсем другую теорию?

В итоге, точки над «i» расставили те же физики-теоретики. Строгое рассмотрение в рамках квантовой механики колебательных спектров белковых молекул показало, что оба подхода вытекают из решения одного волнового уравнения **Шредингера**, в котором учтены все, в

частности и нелинейные, взаимодействия. Когерентность Фрелиха отвечает статическому (независимому от времени) решению, а солитоны Давыдова – динамическому.

### Литература

1. Давыдов А.С. Солитоны в биоэнергетике,- 1986,- Наукова Думка, Киев.

2. Филиттов А.Т. Многоликий солитон (Библиотечка «Квант», вып. 48), – 1990. – Наука, М.

### А.В. Якунов

кандидат физико-математических наук, кафедра оптики физического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

# ЗАДАЧИ ДЛЯ СООБРАЗИТЕЛЬНЫХ

Все вы прекрасно знаете, как необходимо для вашего будущего знание математики. А лучшая форма творческой работы по математике – это решение задач, занятие интересное, но и довольно трудное.

Исаак Ньютон писал в своей «Всеобщей арифметике»: «Для изучения наук задачи полезней правил». Они помогают ощутить красоту и величие математики и испытать радость творчества. Важно ведь не просто найти решение, оно должно быть изящно,

гармонично, просто, что прекрасно выражает латинская поговорка:

**«Простота – печать истины».**

Удивительные тайны математики помогут вам раскрыть и такие задачи:

**4.1.** Тремя двойками, не употребляя знаков математических действий, запишите возможно большее число.

**4.2.** Теперь тремя тройками, не употребляя знаков математи-

ческих действий, запишите возможно большее число.

**4.3.** Постарайтесь тремя четвёрками, не употребляя знаков математических действий, записать возможно большее число.

**4.4.** Теперь попробуйте четырьмя единицами, не употребляя знаков математических действий, записать возможно большее число.

**4.5.** Возможно ли, используя все 10 цифр – 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и знаки математических действий – получить число 9?

## ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

к задачам из № 2–3 2009 г.

**2.1.** Да. Сначала число А запишем так:  $A = 10a + b$ . После перенесения последней цифры  $b$  этого числа в его начало получим новое число:  $B = b \cdot 100000 + a$ .

Так как число  $A = 10a + b = 7a + 3a + b$  делится на 7, то на 7 делится также число  $3a + b$ , а следовательно, и число  $3B = b \cdot 300000 + 3a = b \cdot 299999 + 3a + b = b \cdot 7 \cdot 42857 + 3a + b$ .

Поэтому на 7 делится и число В.

**2.2.** Братьям 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 и 26 лет, а их отцу – 48 лет.

Пусть  $n$  – возраст самого младшего брата,  $a$  – промежуток времени, через который рождались братья, а  $m$  – возраст их отца.

По условию задачи  $n + (n + a)^2 + (n + 2a)^2 + \dots + (n + 8a)^2 = 9n^2 + 72na + 204a^2 = (3n)^2 + 2 \cdot 3n \cdot 12a +$

$+(12a)^2 + 60a^2 = (3n + 12a)^2 + 60a^2 = m^2$ .

Поскольку  $n \geq 1$ ,  $a \geq 1$ , из соображений здравого смысла,  $m \leq 100$ , а разность возрастов отца и самого старшего сына не меньше 14 лет. Путём подбора нетрудно установить, что минимальными значениями подходящими  $n$  и  $a$ , при которых выполняется равенство  $(3n + 12a)^2 + 60a^2 = m^2$ , являются соответственно  $n = 2$ ,  $a = 3$  и, следовательно,  $m = 48$ .

**2.3.** 89. Пусть  $m$  и  $n$  количество соответственно десятков и единиц двузначного числа. Тогда по условию задачи  $10m + n = m + n^2$ . Отсюда  $9m = n(n - 1)$  и поскольку  $1 \leq m \leq 9$ ,  $0 \leq n \leq 9$ , требование задачи выполняется лишь при  $m = 8$ ,  $n = 9$ .

**2.4.** 9801. Обозначим  $x$  и  $y$  количество соответственно десятков и единиц двузначного числа, квадрат которого по условию задачи равенется  $abcd$ , т.е.

$abcd = (10x + y)^2 = 100x^2 + 20xy + y^2$ .

Следует отметить, что  $y \neq 0$ , в противном случае было бы  $c = d = 0$  и  $a = b$ , а такого квадрата нет.

Кроме того,  $y$  не может равняться ни 3, ни 7, поскольку тогда  $d = 9$  и из равенства  $a = b + d$  вытекает, что  $a = 9$ , а число 9009 не квадрат.

Число  $y$  не может также равняться 4, 5 и 6, поскольку в этом случае невозможно подобрать  $x$  так, чтобы цифра десятков в числе  $20xy + y^2$  равнялась нулю.

Из оставшихся вариантов значений  $x$  и  $y$  лишь  $x = y = 9$  отвечает условию задачи:

$(99)^2 = 9801$ .

**2.5.** Пенал стоит 10 гривен; у одной школьницы было 9,99 грн, а у другой денег вообще не было.