

Нелинейные волны в микротрубочках аксонов нервных клеток

А.Н. Бугай^{1,*} С. Здравкович^{2†}

¹Объединенный институт ядерных исследований.

Россия, 141980, Московская обл., Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

²Институт ядерных исследований «Винча».

Сербия, 11001, Белград.

Рассмотрены нелинейные волны в микротрубочках, являющихся структурным элементом клеток живых организмов. Исследованы различные типы солитонных решений, описывающих согласованное распространение поляризации и деформации в локальном структурном переходе в микротрубочке.

PACS: 87.16.Ка, 87.15.Н-

УДК: 538.9

Ключевые слова: нелинейная динамика, солитон, структурный переход.

Микротрубочки представляют собой длинные неразветвленные тонкие цилиндры с наружным диаметром около 25 нм и внутренним — 15 нм. Наиболее протяженные микротрубочки, входящие в состав аксонов нервных клеток могут достигать нескольких миллиметров в длину. Трубочки построены, как правило, из 13 нитей полимера, называемых протофиламентами. Каждый протофиламент состоит из субъединиц, соединенных в линейном порядке, а каждая субъединица является димером, содержащим α - и β -молекулы белка тубулина (Рис. 1). Микротрубочки играют ключевую роль при клеточном делении, секреции, межклеточной транспортировке веществ.

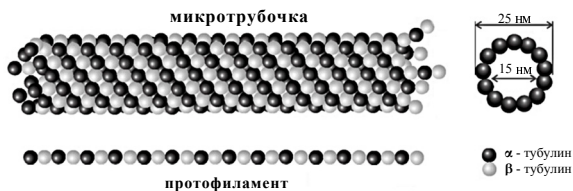


Рис. 1: Структура участка микротрубочки с характерными размерами

Микротрубочки привлекают интерес физиков с точки зрения как их нелинейной динамики [1, 2], так и возможного участия в квантовых вычислениях [3, 4]. Процессы переноса сигналов и энергии различными структурными возмущениями микротрубочек интенсивно исследовались для простых однокомпонентных моделей. В настоящей работе предпринята попытка обобщения данных результатов путем построения модели с несколькими степенями свободы. При этом в качестве конкретного объекта выбраны микротрубочки в аксонах нервных клеток, обладающие достаточной структурной стабильностью и большой длиной.

Применяемый модельный подход [1, 2] использует усредненное описание динамики микротрубочки в рам-

ках одного протофиламента, когда влияние соседей учитывается эффективным потенциалом. Каждый n -й димер тубулина вдоль цепи протофиламента характеризуется проекцией u_n дипольного момента на продольную ось симметрии микротрубочки, а расстояние между соседними димерами задается величиной r_n . Изменение внутреннего распределения зарядов димера допускает наличие двух устойчивых состояний, характеризующихся различными дипольными моментами и конформацией. Гамильтониан такой бистабильной системы может быть записан согласно [5]:

$$H = \sum_n \left(\frac{1}{2} m \dot{u}_n^2 + \frac{1}{2} M \dot{r}_n^2 + \frac{k}{2} (u_{n+1} - u_n)^2 + \frac{K}{2} (r_{n+1} - r_n)^2 - A u_n^2 + B u_n^4 - \mu E u_n + (r_{n+1} - r_n) (a(u_n - u_0) + b(u_n - u_0)^2) \right), \quad (1)$$

где m и M обозначают приведенную и полную массы димера тубулина, величины k и K характеризуют взаимодействие между ближайшими соседями вдоль протофиламента. Коэффициенты A , B и μ задают двухматричный потенциал, описывающий структурный переход внутри одного димера. Данный потенциал является несимметричным вследствие воздействия коллективного электрического поля E микротрубочки на отдельный димер. Последние два слагаемых в (1) с параметрами a и b учитывают связь деформации микротрубочки и структурного перехода внутри отдельного димера тубулина. Здесь величина u_0 характеризует равновесный дипольный момент тубулина в основном состоянии с наименьшей энергией.

Анализ соответствующих (1) уравнений движения в континуальном приближении показывает возможность существования целого семейства двухкомпонентных солитонных и бризерных решений. Причем в рассматриваемом приближении удается получить явные аналитические выражения. В солитоне компонента r , описывающая деформацию микротрубочки, имеет форму кинка, а компонента u , описывающая изменение локальной поляризации, имеет колоколообразную форму. Численный анализ исходной дискретной систе-

*E-mail: bugay_aleksandr@mail.ru

†E-mail: szdjidji@vinca.rs

мы с учетом столкновений и диссипации показывает, что наибольшей динамической стабильностью обладают топологические солитоны, описывающие локальный коллективный переход из основного в метастабильное состояние димеров тубулина.

Полученные решения связывают распространение электрических и упругих возмущений вдоль микротрубочки. Скорости и другие свойства данных солитонов сильно зависят от коллективного поля микротрубочки, снимающего вырождение в структурных состо-

яниях димеров тубулина. В этой связи различные формы и режимы распространения таких нелинейных волн можно рассматривать как потенциальный механизм передачи внутриклеточных сигналов и энергии вдоль микротрубочек. Дополнительным свидетельством, указывающим на справедливость такого предположения, является соответствие характерных величин скоростей солитонов в микротрубочках и скоростей электрических импульсов в аксонах нервных клеток [6], составляющих десятки метров в секунду.

- [1] *Satarić M.V., Tuszycki J.A., Takula R.B.* Phys. Rev. E **48**. P. 589. (1993).
 [2] *Zdravković S., Satarić M.V., Zeković S.* Europhys. Lett. **102**. P. 38002. (2013).
 [3] *Tuszycki J.A. et al* J. Theor. Biol. **174**. P. 371. (1995).

- [4] *Mavromatos N.E., Nanopoulos D.V.* Int. J. Mod. Phys. B **12**. P. 517. (1998).
 [5] *Маневич Л.И. и др* УФН **164**, №9. С. 937. (1994).
 [6] *Hodgkin A.L., Huxley A.F.* J. Physiol. **108**. P. 500. (1952).

Nonlinear waves in microtubules of nerve cells

A. N. Bugay^{1,a}, S. Zdravković^{2,b}

¹Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 141980, Russia.

²Vinča Institute of Nuclear Research. P.O. Box 522, 11001 Belgrade, Serbia.

E-mail: ^abugay_aleksandr@mail.ru, ^bszdjidji@vinca.rs

Microtubules are important cytoskeleton element of living organisms. In this research nonlinear waves in microtubules are studied, and different types of soliton solutions are derived. Soliton solutions describe propagation of polarization and deformation waves within localized structural transition in microtubule.

PACS: 87.16.Ka, 87.15.H-

Keywords: nonlinear dynamics, soliton, structural transition.

Сведения об авторах

1. Бугай Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; тел.: (496) 216-47-74, e-mail: bugay_aleksandr@mail.ru.
2. Zdravković Slobodan — Ph.D., Research Associate Professor; tel.: +381 11 340-85-24, e-mail: szdjidji@vinca.rs.