

Самосборка надмолекулярных гомохиральных структур в растворах хиральных биомиметиков

С. В. Стывбун^{1,a}, А. М. Занин¹, А. А. Скоблин¹, М. Г. Михалева¹,
Д. В. Зленко², В. А. Твердислов^{3,b}

¹Институт химической физики имени Н. Н. Семенова РАН,
Россия, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 4

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, биологический факультет,
кафедра биофизики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12.

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра биофизики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^as.stovbun@chph.ras.ru, ^btverdislov@mail.ru

Статья поступила 06.10.2014, подписана в печать 10.11.2014.

Обнаружен и описан феномен образования гомохиральных множеств супрамолекулярных вихрей в ксерогелях низкоконцентрированных хиральных биомиметиков ТФААС, метрически подобных определенным макромолекулярным и макроскопическим спиральным биологическим структурам. Каждый такой вихрь с характерным масштабом ~ 1 мм приблизительно соответствует группам поворотной симметрии S_n в зависимости от числа струн, имеющих общее закрепление или формирующихся из одной нуклеации и испытывающих взаимное согласованное уклонение. Существенно, что направление уклонения изменяется на противоположное при смене хиральности энантиомера и не зависит от типа растворителя. В смесях различных хиральных соединений наблюдается как ослабление, так и усиление этой тенденции. Полученный результат является важным подтверждением предложенного авторами синергетического правила, согласно которому при изменении знака хиральности базовых мономеров изменяется на противоположный знак хиральности образующейся из них надмолекулярной спирали. Закономерность имеет фундаментальный характер и как тенденция выполняется в иерархиях макромолекулярных структур ДНК, белков, полисахаридов.

Ключевые слова: биомиметики, хиральность, энантиомеры, трифторацетиловые аминоспирты, струны, надмолекулярные спирали и вихри.

УДК: 535.71. PACS: 87.16.ad, 87.64.km, 87.64.mc.

Введение

Исследование механизмов структурообразования в низкоконцентрированных растворах хиральных соединений трифторацетилованных аминоспиртов (ТФА-

АС, структурные формулы — см. таблицу) [1–3] является естественным развитием направления исследований, посвященных супрамолекулярной самоорганизации [4], в том числе самоорганизации частично фторированных соединений, таких как фторированные спирты [5],

Структурные формулы ТФААС-1 — ТФААС-8, исследованных авторами

<p>ТФААС-1</p>	<p>ТФААС-2 (ахиральный)</p>	<p>ТФААС-3</p>	<p>ТФААС-4 (два хиральных центра)</p>
<p>ТФААС-5</p>	<p>ТФААС-6</p>	<p>ТФААС-7</p>	<p>ТФААС-8</p>

фторированные аминокислоты [6], частично фторированные аминокислоты [7, 8]. Оно представляет значительный научный интерес по следующим причинам. Во-первых, в процессе спонтанной самосборки этих низкомолекулярных соединений могут образовываться хиральные (спиральные) макроскопические структуры, в том числе целые их иерархии в виде струн и суперструн [9, 10]. С физической точки зрения это явление само по себе достаточно уникально. Во-вторых, подобные процессы структурообразования могут наглядно имитировать характерные тенденции формирования макромолекулярных биологических структур, демонстрируя принципиальную роль пребиологических хиральных мономеров (аминокислот, углеводов, нуклеотидов) в формировании молекулярно-биологических структурно-функциональных иерархий на начальных стадиях биопоэза [11, 12].

В предыдущих публикациях мы описали феномен и механизмы формирования хиральных струн в растворах ТФААС [1–3, 9, 10, 13–15]. Непосредственная задача настоящего исследования состояла в прямом наблюдении зависимости знака хиральности образующихся вихревых надмолекулярных структур от знака хиральности или степени гетерохиральности растворов молекул ТФААС. Ранее было показано, что отклонение от радиального роста индивидуальной струны с закрепленным концом связано с возникающими при ее сборке крутильными напряжениями [16]. Источником этих напряжений являются ван-дер-ваальсовы силы притяжения спиральных субмикроскопических струн (формирующих микроскопическую струну), обратный конус которых при этом скручивается и может принять спиралевидную форму (рис. 1) [16, 17].

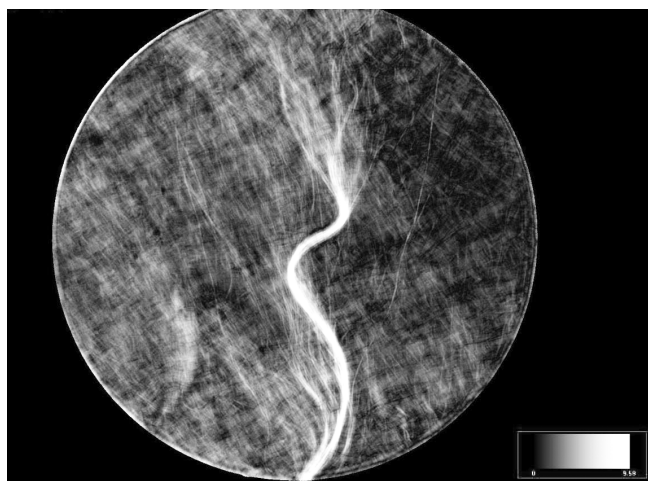


Рис. 1. Инвертированный оптический микроскоп Leica DMI 6000, диаметр оптического поля 10 мкм. Раствор ТФААС-4 (S, S — два хиральных центра) в гептане, 1 мг/мл. Спиралевидная форма конца растущей микроскопической струны (обратного конуса субмикроскопических струн)

1. Результаты и обсуждение механизмов

В настоящей работе обнаружен и описан феномен образования гомохирального множества супрамолекулярных вихрей (рис. 2) в ксерогеле различных низкоконцентрированных хиральных растворов ТФААС

[1–3]. Каждый такой вихрь приблизительно соответствует группам поворотной симметрии S_n в зависимости от числа струн, имеющих общее закрепление или формирующихся из одной нуклеации и испытывающих взаимное согласованное отклонение (рис. 2). Данные сюжеты были обнаружены нами при анализе большого количества (более 1000) микрофотографий образцов ксерогелей низкоконцентрированных растворов хиральных ТФААС. Растворы ТФААС изготовлены по методике [18], растворители чистотой 99.9 %, поставщик — фирма Химмед, оптический микроскоп (ОМ) МИКМЕД-6 (ЛОМО, Россия). Экспериментально было обнаружено, что струны, имеющие общий центр закрепления, образуют в ксерогеле раствора ТФААС-3 множество случайно расположенных, но гомохиральных вихрей (рис. 2, 3). При этом их знак хиральности не зависел от растворителя и менялся на противоположный при смене хиральности энантиомера. Это явление отчетливо наблюдалось в ксерогелях гомохиральных растворов ТФААС-3 в CCl_4 (рис. 2, 3; S — отклонение влево, R — отклонение вправо) и изопропанол (ИП), а также ТФААС-6 в ИП (R — отклонение вправо). В то же время в ксерогелях гомохиральных растворов ТФААС-3 в гептане, циклогексане (ЦГ) и метилциклогексане (МЦГ); ТФААС-4 в гептане и ИП; ТФААС-5 в гептане, бензоле, CCl_4 , ЦГ и МЦГ; ТФААС-6 в гептане, бензоле, CCl_4 , ЦГ, МЦГ и касторовом масле; ТФААС-7 в гептане и ЦГ; ТФААС-8 в гептане, ЦГ и касторовом масле наблюдался радиальный рост прямолинейных на масштабе наблюдения (~ 1000 мкм) струн, формирующихся из общей нуклеации (типичный пример — рис. 4).

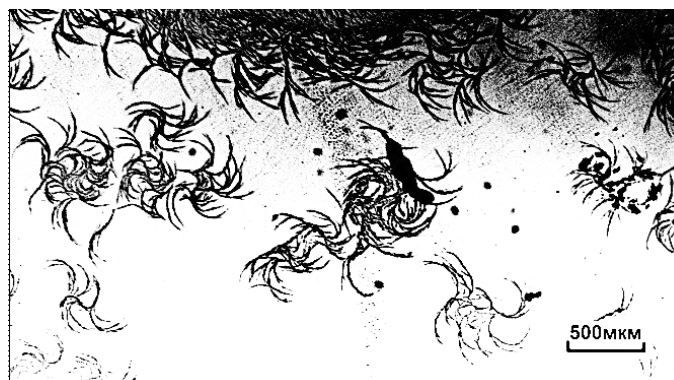


Рис. 2. ОМ МИКМЕД-6. Ксерогель раствора ТФААС-3 (S), исходная концентрация 0.4 мг/мл в CCl_4



Рис. 3. ОМ МИКМЕД-6. Ксерогель раствора ТФААС-3 (R), исходная концентрация 0.4 мг/мл в CCl_4

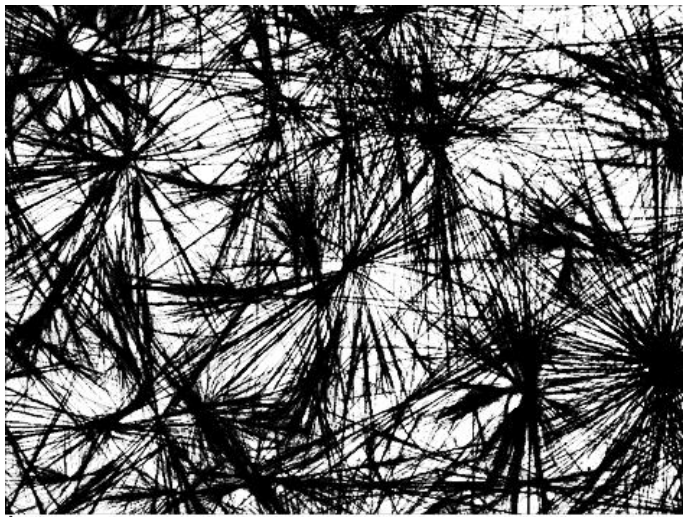


Рис. 4. ОМ МИКМЕД-6, размер штриха 100 мкм. Ксерогель раствора ТФААС-6 (R), исходная концентрация 5 мг/мл в бензоле

Рассмотрим коротко механизм возникновения скручивающих напряжений. Уклонение струн от прямолинейности наблюдалось, когда несколько струн росли из единого центра или струны ответвлялись от магистральных струн (рис. 2, 3). Как известно, струны суперспирализованы [10], а потому вращаются вокруг своей оси в ходе формирования [16, 17]. Поскольку вращение конца струны, противоположного растущему, в перечисленных случаях стеснено, то вращение ее растущего конца приводит к нарастанию в струне скручивающих напряжений [16]. Когда момент действующих на струну сил превышает критическое значение [19, 20]

$$M_C = \frac{2\pi\Gamma}{L}, \quad (1)$$

где L — длина струны, R — радиус струны, $\Gamma = (\pi/4)ER^4$ — ее изгибная жесткость, E — модуль Юнга материала струны; прямолинейная форма струны теряет устойчивость, и она изгибается, что приводит к сбросу напряжений [16, 19, 20]. При диаметре струн $d \sim 1$ мкм, экспериментально наблюдаемый характерный масштаб потери устойчивости $\Lambda \sim 10^2 - 10^3$ мкм. Это позволяет оценить модуль Юнга материала струн сверху [16]:

$$E \lesssim E^*, \quad E^* \approx \frac{16}{3}\eta\alpha^2 L^* \Lambda \frac{v}{R^4 l} \sim 10^8 - 10^{10} \text{ дин/см}^2, \quad (2)$$

где $\eta \sim 10^{-2}$ г/см·с — коэффициент вязкости растворителя, $\alpha \approx 0.1 - 0.3$ — типичный угол полураствора обратного конуса, $L^* \sim 100 - 300$ мкм — типичная длина обратного конуса, $v \sim 1 - 10$ мкм/с — скорость роста струны, $R \sim 0.3 - 1$ мкм, $l \sim 10$ мкм — типичный шаг формирующейся спирали, и при этом E^* близко к типичным модулям Юнга различных полимеров [21].

Регулярный характер уклонения, зависящий на рассматриваемом масштабе (~ 1000 мкм) только от знака хиральности энантиомера ТФААС (рис. 2, 3), указывает, что все суперспирализованные струны, имеющие приблизительно один и тот же диаметр, при формировании закручиваются вокруг своей оси в одну и ту

же сторону, т.е. направление закручивания при суперспирализации (для одного и того же уровня иерархии в иерархической системе струн [10]) является общим для всех струн в растворе данного состава и определяется знаком молекулярной хиральности энантиомера.

В растворах смесей различных гомохиральных ТФААС наблюдалось как усиление, так и ослабление описанного явления. Так, в ксерогелях смеси ТФААС-3 (S) и ТФААС-5 (R) (и соответственно ТФААС-3 (R) и ТФААС-5 (S)) регулярное отклонение струн наблюдалось в ксерогелях растворов в CCl_4 , ИП, гептане, ЦГ и МЦГ и также приводило к формированию многочисленных гомохиральных вихрей с характерным масштабом ~ 1 мм (рис. 5). Знак отклонения не зависел от растворителя и определялся хиральностью ТФААС-3 (S — отклонение влево, спираль в ходе роста струн закручивается против часовой стрелки; R — отклонение вправо, спираль закручивается по часовой стрелке). Таким образом, добавка энантиомера ТФААС-5 противоположной хиральности усиливала эффект, характерный для ТФААС-3. Эффект наблюдался также в ксерогелях растворов смесей ТФААС-3 (S) и ТФААС-5 (S) в гептане, ИП и ЦГ, однако был менее выражен.

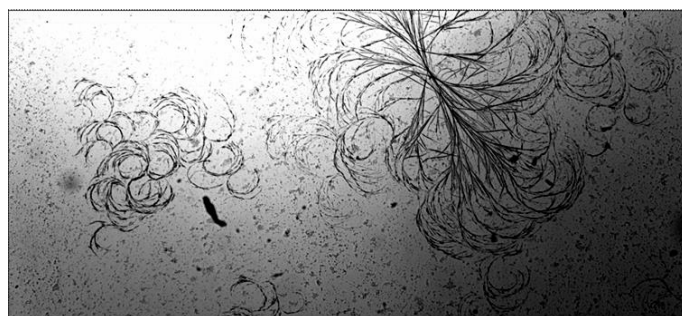


Рис. 5. ОМ МИКМЕД-6. Размер поля 2.6×1.1 см. Ксерогель раствора смеси ТФААС-3 (S), исходная концентрация 0.4 мг/мл, и ТФААС-5 (R), исходная концентрация 0.4 мг/мл в гептане

В то же время в ксерогелях растворов смеси ТФААС-3 (S) и ТФААС-6 (R) эффект не наблюдался, т.е. добавка энантиомера ТФААС-6 противоположной хиральности ослабляла эффект, характерный для ТФААС-3.

Очевидно, что остается открытым вопрос о физико-химических особенностях выбора хиральности и характеристического размера вихрей в зависимости от состава раствора (вида растворителя и энантиомера). В то же время, представления о макроскопической динамике струны [16, 17, 10] позволяют объяснить регулярный характер уклонения струн в каждом супрамолекулярном вихре.

Струны, формирующие вихрь, имеют приблизительно одинаковый диаметр, примерно одинаковый радиус кривизны (характеризующий отклонение от прямолинейности) и отстоят друг от друга приблизительно на одинаковые углы ($\approx 2\pi/n$, где n — число струн, формирующих вихрь). Это позволяет предположить, что указанный набор примерно одинаковых струн начинает одновременно расти в радиальных направлениях из единой нуклеации, т.е. вначале формируется центрально симметричная радиально распространяющаяся

автоволна растущих струн (рис. 4). Затем нарастающие в формирующихся струнах крутильные напряжения одновременно достигают критического значения (1), что приводит к одновременному изгибу струн. В этот момент происходит нарушение центральной симметрии формирующейся автоволны и ее спонтанная трансформация в хиральную автоволну (рис. 2, 3, 5). Итак, автоволновой процесс радиального роста струн из нуклеации (ахиральная автоволна) спонтанно трансформируется в автоволну с хиральной симметрией, что и проявляется в потере симметрии системы. Таким образом, причиной нарушения симметрии системы является потеря устойчивости симметричного решения (в данном случае потеря устойчивости прямолинейной формы радиальных струн), что вообще характерно для различных случаев нарушения симметрии.

Отметим, что хиральные автоволны наблюдались нами только в ксерогелях, но не в жидких растворах. По-видимому, это связано с тем, что при переходе от трехмерных систем к двумерным (каковыми являются ксерогели, формирующиеся при испарении растворителя) кооперативность систем возрастает.

2. Заключение и биологические экстраполяции

Эффект появления хиральности (спина) при автоволновых процессах в открытых системах известен: например, спиновое горение, обнаруженное Щелкиным [22], спиральные автоволны в химических реакциях Белоусова–Жаботинского, а также в живых системах [23]. С физической точки зрения формирование спиральных структур из молекул ТФААС можно рассматривать как автоволновой процесс, что объединяет подходы к системам с разной размерностью, к распределенным и дискретным активным средам.

В настоящей работе

1) экспериментально наблюдалось образование гомохиральных супрамолекулярных структур — вихрей при регулярном уклонении струн, формирующихся в ксерогелях хиральных растворов из общих нуклеаций, влево или вправо от прямолинейного направления, причем направление уклонения не зависело от растворителя и изменялось на противоположное при смене хиральности энантиомера;

2) сделан вывод, что обнаруженный эффект связан с суперспирализацией струн, их вращением в ходе роста, накоплением в струнах скручивающих напряжений и последующей потерей устойчивости радиальной (прямолинейной) формы, а регулярный характер отклонения указывает, что это происходит в гомогенной популяции субмикроскопических струн, формирующихся из общей нуклеации;

3) направление закручивания при суперспирализации (для одного и того же уровня иерархии в иерархической системе струн) является общим для всех струн в растворе данного состава и определяется знаком молекулярной хиральности энантиомера;

4) экспериментально установлено, что в смесях различных ТФААС эффект может как усиливаться, так и ослабляться, что в некоторых случаях приводит к формированию многочисленных двумерных макроскопических спиральных структур (доменов) с единым направлением закручивания спирали и с характерным

масштабом ~ 1 мм, метрически и структурно подобных системам, широко распространенным в живой природе;

5) сделан вывод, что одновременная потеря устойчивости прямолинейной формы струн, растущих из единой нуклеации, приводит к нарушению центральной симметрии радиальной автоволны формирования струн и трансформации ее в хиральную автоволну, что находит многочисленные аналогии как в простых физических системах, так и в живой природе.

Разрабатываемая авторами синергетическая концепция эволюции хиральных систем в общем виде может быть сформулирована следующим образом: нелинейная эволюционирующая система, обладающая запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии, проходя в своем развитии точки бифуркации, образует последовательность иерархических уровней с чередующимся знаком преобладающей хиральности заново образующихся структур. В цитированных выше наших публикациях содержались материалы относительно формирования знакопеременной череды хиральных структур в струнах, образуемых простейшими хиральными биомиметиками ТФААС [13, 24]. В настоящей работе обсуждаемая концепция получила свое логическое развитие: уже другой тип макроскопических хиральных структур — вихревой — демонстрирует прямую зависимость знака закрученности «солнцеворота» от знака молекулярной хиральности базового соединения ТФААС. При этом следует учитывать, что эти два иерархических уровня могут быть не соседствующими, но «дальний порядок» связанности очевидным образом выполняется.

Данная тенденция метрически и структурно в качестве фундаментального принципа проявилась в молекулярно-биологических структурах на начальных стадиях предбиологической эволюции. Так, нами прослежено закономерное чередование знака хиральности D–L–D–L при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации ДНК, так же как и смена знака хиральности L–D–L–D при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации белковых структур [11, 12]. Знакопеременные хиральные иерархии ДНК и белков в свою очередь образуют комплементарно сопряженную хиральную пару, которая представляет собой ахиральный инвариант, «замыкающий» молекулярно-биологический блок живых систем.

Предпринятое нами исследование струн и вихрей, образующихся из одних и тех же молекул ТФААС, демонстрирует возможность структурных вариаций в подобных надмолекулярных системах, сопровождающихся изменением типа их симметрии. Механохимия биомакромолекул и, в более широком смысле, работа молекулярных машин, как правило, связана не с тривиальными переходами «порядок/беспорядок», а с изменением характера симметрии в иерархиях спиральных структур [11, 12]. Иерархии упорядоченных спиральных структур служат основой «выделенных механических степеней свободы» молекулярных машин, преобразующих энергию, вещество и информацию в клетках.

При всем богатстве разномасштабных конструкций, осуществляющих энергозависимые механохимические процессы в клеточных органеллах и надклеточных

образованиях, все они имеют молекулярную хиральную основу. Хорошим примером такого поведения можно считать клеточный цитоскелет, в частности его тубулиновую составляющую [25]. Микротрубочки в живой клетке образуют звездоподобные структуры, аналогичные показанным на рис. 4. Клеточный центр, расположенный в непосредственной близости от ядра клетки, служит центром организации для множества расходящихся от него тубулиновых микротрубочек, которые помимо структурных функций, служат также для коммуникации между центром клетки и её периферией. Отметим, однако, что система из радиально расходящихся белковых микротрубочек не формируется сама по себе, а требует участия дополнительных белков [25]. Это сильно усложняет систему и затрудняет понимание исходных механизмов, управляющих самосборкой и самоорганизацией, в том числе и в живых системах. По этим соображениям представляется эволюционно целесообразным развитие макроскопических хиральных внутриклеточных или внеклеточных структур, встречающихся в цитоскелетах различных клеток, включая микротрубочки [26], или же во внеклеточной цитоплазматической сети протистов, в ресничках, жгутиках у бактерий, в щупальцах гидромедуз тубулярий [27]. Во всех случаях при их функционировании прослеживается изменение симметрии, а хиральность представляется чрезвычайно удачной эволюционной находкой, связывающей коллективные изменения в иерархиях биомолекулярных структур.

Список литературы

1. *Stovbun S.V.* // Хим. физика. 2011. **30**, № 8. С. 3.
2. *Stovbun S.V., Zanin A.M., Skoblin A.A.* и др. // ДАН. 2012. **442**, № 5. С. 645.
3. *Stovbun S.V., Skoblin A.A.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 4. С. 3 (*Stovbun S.V., Skoblin A.A.* // *Moscow University Phys. Bull.* 2012. **67**, № 4. P. 317).
4. *Израелашвили Дж.* Межмолекулярные и поверхностные силы. М., 2011.
5. *Borges A.R., Hyacinth M., Lum M.* et al. // *Langmuir*. 2008. **24**. P. 7421.
6. *Qiu X, Meng W, Qing F.* // *Tetrahedron*. 2004. **60**, N 32. P. 6711.
7. *Prakash G.K.S., Mandal M., Schweizer S.* et al. // *Organic Lett.* 2000. **2**, N 20. P. 3173.
8. *Xu Y, Kang C, Chen Y.* et al. // *Chem. Eur. J.* 2012. **18**, N 52. P. 16955.
9. *Стовбун С.В., Занин А.М., Скоблин А.А.* и др. // Хим. физика. 2011. Т. **30**, № 12. С. 55.
10. *Стовбун С.В., Скоблин А.А., Занин А.М.* и др. // Бюлл. эксперим. биол. и мед. 2012. **154**, № 7. С. 41.
11. *Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Яковенко Л.В.* // Биофизика. 2012. **57**, № 1. С. 146.
12. *Твердислов В.А.* // Биофизика. 2013. **58**, № 1. С. 159.
13. *Стовбун С.В., Скоблин А.А., Твердислов В.А.* // Бюлл. эксперим. биол. и мед. 2011. **152**, № 12. С. 644.
14. *Стовбун С.В., Занин А.М., Скоблин А.А.* и др. // Хим. физика. 2013. **32**, № 1. С. 21.
15. *Стовбун С.В., Скоблин А.А., Занин А.М.* и др. // Хим. физика. 2013. **32**, № 3. С. 12.
16. *Стовбун С.В., Скоблин А.А., Занин А.М.* // Хим. физика. 2014. **33**, № 5. С. 21.
17. *Стовбун С.В., Скоблин А.А., Занин А.М.* и др. // Бюлл. эксперим. биол. и мед. 2012. **153**, № 6. С. 820.
18. *Стовбун С.В., Михайлов А.И., Занин А.М., Костяновский Р.Г.* // Вестн. МГОУ. Сер. Естественные науки. 2011. № 3. С. 92.
19. *Лось М.В., Орданович А.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 1994. № 5. С. 48.
20. *Лось М.В., Орданович А.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2000. № 6. С. 33.
21. *Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова.* М., 1991.
22. *Щелкин К.И.* Быстрое горение и спиновая детонация газов. М., 1949.
23. *Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Яковенко В.А.* Биофизическая экология. М., 2012.
24. *Стовбун С.В., Михайлов А.И., Скоблин А.А.* и др. // Хим. физика. 2012. **31**, № 1. С. 55.
25. *Surrey T., Nédélec F., Leibler S., Karsenti E.* // *Science*. 2001. **292**, 5519. P. 1167.
26. *Нельсон Д., Кокс М.* Основы биохимии Ленинджера. Т. 1. Основы биохимии строения и катализ. М., 2011.
27. *Геккель Э.* Красота форм в природе. СПб., 2007.

Self-assembly of supramolecular homochiral structures in solutions of chiral biomimetics

S. V. Stovbun^{1,a}, **A. M. Zanin**¹, **A. A. Skoblin**¹, **M. G. Mikhaleva**¹, **D. V. Zlenko**², **V. A. Tverdislov**^{3,b}

¹ *N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia.*

² *Department of Biophysics, Faculty of Biology, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

³ *Department of Biophysics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^a *s.stovbun@chph.ras.ru*, ^b *tverdislov@mail.ru*.

The phenomenon of the formation of homochiral sets of supramolecular vortices in xerogels with a low concentration of chiral biomimetics of trifluoroacetylated amino alcohols that are metrically similar to certain macromolecular and macroscopic helical biological structures was discovered and described. Each vortex, with a characteristic scale of ~ 1 mm, corresponds approximately to the rotational symmetry S_n groups depending on the number of strings that have a common anchorage or are formed from a single nucleation and experience a mutual agreed deviation. It is essential that the direction of deviation is changed to the opposite one with the change of the chirality of the enantiomer and does not depend on the solvent type. Both weakening and strengthening of this trend were observed in the mixtures of various chiral compounds. The result is an important confirmation of the synergetic rule that was proposed by authors. According to this rule, the sign of the chirality of a supramolecular helix is changed to the opposite with a change in the chirality sign of the basic monomers from which it is formed. This regularity has a fundamental character and is executed as a trend in the hierarchies of DNA, protein, and polysaccharide macromolecular structures.

Keywords: biomimetics, chirality, enantiomers, trifluoroacetylated amino alcohols, strings, supramolecular helices and vortices.

PACS: 87.16.ad, 87.64.km, 87.64.mc.

Received 6 October 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2015).

Сведения об авторах

1. Стовбун Сергей Витальевич — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-72-25, e-mail: s.stovbun@chph.ras.ru.
2. Занин Анатолий Михайлович — канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-72-25.
3. Скоблин Алексей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-72-25.
4. Михалева Мария Геннадьевна — аспирант, инженер-исследователь; тел.: (495) 939-72-25.
5. Зленко Дмитрий Владимирович — канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник.
6. Твердислов Всеволод Александрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: tverdislov@mail.ru.