

# Низькоенергетична кооперативна поведінка біополімерів зумовлена колективними вібронними взаємодіями

Д. М. Говорун

Інститут молекулярної біології та генетики НАН України  
252143, Київ, вул. Академіка Заболотного, 150

*Спираючись на результати власних досліджень стереохімічної нежорсткості канонічних нуклеотидних основ та її квантовохімічної природи, а також на літературні дані, в першу чергу, на концепцію вібронних взаємодій (Берсукер, 1987), автор доводить, що елементарними структурними ланками — носіями кооперативних властивостей нуклеїнових кислот (НК) є нуклеозиди — ян-теллерівські молекулярні структури, а низькоенергетична кооперативна поведінка НК в цілому зумовлена колективними вібронними взаємодіями. Зроблено цілу низку біологічно важливих висновків. Найвагоміший серед них полягає в тому, що саме низькоенергетичні (тобто такі, енергія котрих співмірна з енергією теплових флуктуацій при фізіологічній температурі) електронно-конформаційні збудження НК, доцільно ініційовані у той чи інший спосіб (резонансний чи нерезонансний) шляхом вібронного управління — збуренням неадиабатичного змішування електронних станів, відіграють чи не найважливішу роль у перебігу широкого кола біологічно важливих процесів, органічно опосередкованих високоспецифічними актами макромолекулярного розпізнавання.*

Однією з характерних ознак функціонуючих біологічних об'єктів, зокрема живої клітини [1], є їхня суттєво кооперативна поведінка [2]. Вважається, що вона зумовлена передусім кооперативними властивостями біополімерів — насамперед білків та нуклеїнових кислот (НК) [1—3]. Завдяки численним експериментальним і теоретичним дослідженням нині вже сформувався основні феноменологічні уявлення про фізико-хімічні закономірності їхньої кооперативної поведінки (див., наприклад, [3, 4] та наведену там бібліографію) — найкраще вивченими є, вочевидь, процеси теплової денатурації [5, 6]. Водночас фундаментальне питання про глибинні фізико-хімічні засади кооперативності біополімерів, зокрема про природу та специфічні властивості її елементарного матеріального носія, залишається відкритим. Встановлено лише, що таким носієм не може бути статична молекулярна структура з постійними властивостями. Він обов'язково повинен мати свій ансамбль мікростанів, а прояви його фізико-хімічних власти-

востей визначаються характером та величиною зовнішнього впливу (збурення) [7].

Спираючись на результати власних досліджень стереохімічної нежорсткості канонічних нуклеотидних основ та її квантовохімічної природи, а також на літературні дані [7—9], в першу чергу, на концепцію вібронної взаємодії [8, 9], автор робить спробу довести, що елементарними структурними ланками — носіями кооперативних властивостей НК є нуклеозиди — ян-теллерівські молекулярні структури, а низькоенергетична кооперативна поведінка НК в цілому зумовлена колективізацією вібронних взаємодій.

Як відомо [10—17], канонічні нуклеотидні основи не є статичними молекулами з незмінними властивостями. Їм притаманна яскраво виражена структурна мінливість, яка проявляється у широкому діапазоні фізико-хімічних форм (прототропна таутомерія [10], структурна ізомерія [11], стереохімічна нежорсткість [12—15], спонтанне дезамінування [16], окислення тощо) і енергій (від десятків кал/моль до десятків ккал/моль [10—17]). З усієї множини форм структурної мінливості основ найважливішою, з огляду на її визначальну

роль у кооперативній поведінці НК, є стереохімічна нежорсткість. Мілкий (низькоенергетичний) рельсф гіперповерхні потенціальної енергії (ГПРЕ) канонічних нуклеотидних основ [18], величина перепадів якого досить мала порівняно з енергією міжмолекулярної взаємодії, характерною для елементарних процесів нуклеїново-нуклеїнового та білково-нуклеїнового впізнання [19—21], а також пов'язане з ним сильне віброне змішування електронних станів за рахунок неадіабатичної взаємодії ядер при зміщеннях із положення рівноваги з електронами [8, 9] призводять до суттєвої залежності їхніх функціонально важливих фізико-хімічних властивостей, зокрема реакційної (комплексотвірної) здатності, від величини і характеру зовнішнього впливу, наприклад міжмолекулярних взаємодій, електромагнітних полів тощо, які можуть мати як резонансний, так і нерезонансний характер.

Так, взаємодія двох будь-яких канонічних нуклеотидних основ залежить від наявності поблизу третьої молекули, причому величина цього ефекту (кооперативність), зумовленого збудженням вібронного змішування електронних станів [8, 9] пари основ взаємодією з третьою молекулою, суттєво залежить як від взаємної просторової орієнтації молекул (стереоспецифічність), так і від величини та характеру (водневе зв'язування, стекінг тощо) міжмолекулярної взаємодії і значно зростає, коли й третя молекула є ян-теллерівською.

Отже канонічні нуклеотидні основи задовольняють всі вимоги [7] щодо елементарного носія кооперативності НК. Основним електронним чинником, що визначає їхню ян-теллерівську поведінку, коли електрони не рухаються безінерційно за ядрами і стан останніх визначається не середнім полем електронів (адіабатичне наближення), а його характерними деталями, зокрема орбітальними вібронними константами [9], є *рл*-спряження вільної електронної пари амінного атома азоту з  $\pi$ -електронною системою кільця [15]. До речі, як показано в [9], використання вібронних констант дозволяє, виходячи з перших принципів, не тільки кількісно описати динаміку ян-теллерівських молекул, зокрема їхні анізотропні пульсаційні рухи (в канонічних нуклеотидних основах вони є площинно-інверсними [12—14] та обертальними [22] і перекривають інтервал від радіочастот до мікрохвильових), а й охарактеризувати внесок кожного електрона у деформацію ядерної конфігурації та її жорсткості як у вільній молекулі, так і під дією зовнішніх сил.

Оскільки фураноза, як і канонічні нуклеотидні основи, є теж, за результатами роботи [23], типо-

вою ян-теллерівською молекулою і, крім того, відомо, що при конденсації пуринової основи з фуранозою з'являється додаткова низькобар'єрна шарнірно-вертикальна рухливість глікозидного зв'язку [14], то елементарним носієм кооперативних властивостей НК є нуклеозид. Характерним, але далеко не єдиним прикладом, який демонструє ян-теллерівську поведінку нуклеозидів канонічних нуклеотидних основ, є залежність динамічних властивостей основи, а саме: її коливального спектру від конформації фуранози, що не лише фіксується експериментально для нуклеотидів у розчині [24], а й використовується у біофізичній практиці як надійний спектроскопічний тест конформаційного стану цукрово-фосфатного ланцюга НК [25]. В основі такої нелінійнодинамічної поведінки нуклеозидів лежать вібронні взаємодії, які, змінюючи свою величину в залежності від конформації фуранози, передаються через внутрішньонуклеозидні водневі зв'язки [26, 27] (в складі ДНК їхню роль перебирають на себе Н-зв'язки С'1Н1'...О2 в піримідинових нуклеотидах і С'1Н1'...N3 — в пуринових) на основу, істотно деформуючи форму долин ГПРЕ, а разом з нею і коливальний спектр. Оскільки величина вібронного змішування залежить від маси ядер [8, 9], то цілком природно, що частоти коливального спектру основи при цьому залежать від заміщення атомів водню фуранози, зокрема атома Н1', на атом дейтерію [24].

При конденсації нуклеозидів у макромолекулу НК індивідуальні вібронні взаємодії в елементарних ян-теллерівських структурних ланках — носіях кооперативності колективізуються [8]. Саме вони і визначають низькоенергетичні кооперативні властивості НК як цілого. Провідна роль у колективізації вібронних взаємодій, тобто їхнього розповсюдження на всю макромолекулу НК, належить основним внутрішньомолекулярним взаємодіям, відповідальним за просторову архітектуру останньої, — стекінгові, який навіть для двох сусідніх пар комплементарних основ, а тим більше в складі НК не може бути зведений до делокалізованої взаємодії копланарних структур [28]; водневим зв'язкам, що стабілізують Уотсон-Криківські пари основ; а також внутрішньонуклеотидним Н-зв'язкам між цукровим залишком і основою за участю атома водню Н1'. Ці взаємодії колективізують віброне змішування, що має місце в окремих нуклеозидах, зокрема, за рахунок впливу на електронне спряження, яке визначає ян-теллерівську природу останніх, при цьому воно виявляється дуже чутливим до акустичних фонів. Характерною ознакою колективних вібронних взаємодій в

системі ян-теллерівських ланок полімера є великий радіус структурної кореляції, величина якого співмірна з розмірами всієї системи [8]. Є всі підстави вважати, що в ДНК провідна роль у низькоенергетичній кооперативній поведінці належить нуклеотидним основам, оскільки серед міжмолекулярних взаємодій, що визначають її структурно-динамічну організацію, специфічна взаємодія між комплементарними основами в Уотсон-Криківських парах та між сусідніми парами значно переважає взаємодію дезоксирибози в сусідніх нуклеотидах між собою та з основами. В гібридних НК і особливо в РНК роль рибози в цих процесах зростає порівняно з ДНК разом із збільшенням енергії внутрішньоланцюгових водневих зв'язків типу «рибоза — основа» та «рибоза — рибоза».

Викладена вище точка зору на фізико-хімічну природу низькоенергетичної кооперативної поведінки НК дозволяє зробити низку біологічно важливих висновків.

1. Низькоенергетичні, тобто такі, енергія котрих співмірна з енергією теплових флуктуацій при фізіологічній температурі, електронно-конформаційні збудження НК, доцільно ініційовані у той чи інший спосіб (резонансний чи нерезонансний) шляхом вібронного управління — збурення неадиабатичного змішування електронних станів, відіграють чи не найважливішу роль у перебігу широкого кола біологічно важливих процесів, опосередкованих високоспецифічними актами макромолекулярного розпізнавання. При цьому вібронне управління, яке реалізується шляхом втягування однієї чи декількох ділянок НК у міжмолекулярні взаємодії, є стереоспецифічним — максимальне його значення має місце у напрямку активних у ефекті Яна-Теллера координат [9] і залежить від характеру міжмолекулярних взаємодій (водневе зв'язування, стейкінг, ван-дер-ваальсові контакти тощо).

2. Особливість низькоенергетичних електронно-конформаційних збурень, що утворюються в процесі функціонування біополімерів при вібронному управлінні, полягає в тому, що вони порівняно легко ініціюють утворення високоспецифічних міжмолекулярних контактів з невеликою вільною енергією і з такою ж легкістю спонукають їх до повернення у початкове (стартове) положення функціональної готовності. До того ж вони є енергоекономічними, оскільки наявність великого вібронного ангармонізму забезпечує високоефективну трансформацію (рекуперацію [29]) енергії, що вивільнюється при утворенні високоспецифічних міжмолекулярних контактів, у коливальну і збереження її протягом тривалого часу у вигляді метастабільних високоамплітудних пульсацій, про які

йшлося вище, за рахунок «вузького горла» у процесах коливальної релаксації [30] з подальшим цільовим її використанням, приміром, для повернення біополімера у стартове положення функціональної готовності.

3. Низькоенергетичне вібронне управління може забезпечувати в НК дистанційне регулювання реакційної (комплексотвірної) здатності на досить великих відстанях (так званий ефект далекодії [31] і тісно пов'язаний з ним алостеричний ефект [32]) за рахунок часової (динамічної) делокалізації електронів [33] вздовж НК (такі явища з аналогічною характерною енергією в органічній хімії називають слабкими взаємодіями [34] і відводять їм неабияку роль у перебігу різноманітних реакцій). Зрозуміло, що стереохімічне підсилення специфічності може реалізуватися не лише шляхом одночасного втягування у селективні водневі зв'язки як основи, так і фуранози одного нуклеотиду [35, 36], а й основи і фуранози досить віддалених нуклеотидів. Але незалежно від способу реалізації стереохімічного підсилення специфічності воно визначається, в основному, низькоенергетичними кооперативними властивостями НК, що зобов'язані своїм походженням колективним вібронним взаємодіям.

4. Можливість реалізації вібронного управління кооперативними властивостями НК в резонансному режимі шляхом використання електромагнітного випромінювання у частотному діапазоні пульсаційних квантовомеханічних коливань НК дозволяє несуперечливо пояснити з єдиних позицій низку ефектів, пов'язаних з дією надслабкого електромагнітного випромінювання на біологічні об'єкти [37—39].

5. Низькоенергетична кооперативна поведінка біополімерів значною мірою зумовлює їхню синергетичну поведінку в умовах термодинамічної нерівноважності [40], зокрема детермінує функціонально важливі процеси зародження стаціонарних нерівноважних станів через когерентні макроскопічні флуктуації. Часова синхронізація останніх забезпечується, поряд з іншими факторами, резонансною електромагнітною взаємодією пульсаційних коливань компонентів біополімерів. Не виключено, що при цьому можуть мати місце неперервні фазові переходи [41].

6. З принципових міркувань адитивне, ригідне наближення, яке набуло в молекулярній біофізиці широкого розповсюдження, не може використовуватися для пояснення глибинних механізмів біохімічних та біофізичних процесів за участю біополімерів у функціонуючих біологічних системах. Ці процеси мають суттєво кооперативний, адаптивний характер [3, 42]. З точки зору функціональної

активності біополімерів гіпотетичні ригідні і адитивні взаємодії не є функціонально значущими, оскільки вони не в змозі навіть сформувані низькоенергетичний структурний сигнал з достатньо великим часом релаксації.

7. На відміну від органічних полімерних систем — представників неживої природи, що являють собою низку квазіжорстких, динамічно стійких структурних ланок, послідовно з'єднаних ординарними хімічними зв'язками і охоплених сіткою міжмолекулярних водневих зв'язків, нуклеопротейдні комплекси функціонують як складні висококооперативні ієрархічні системи з мережею нелінійнодинамічних зв'язків, певна частина яких (якщо не всі) зумовлена емерджентними властивостями [43] (тобто здатністю набувати в комплексі нових функціонально значущих структурно-динамічних властивостей, нехарактерних для «вільного» стану) біополімерів, що складають комплекс. Функціонування складних нуклеопротейдних комплексів в біологічних системах принципово не може бути зведене лише до елементарних актів цілеспрямованого утворення — розпаду множини високоспецифічних, взаємозалежних парних контактів. Не менш важливим атрибутом цих процесів є структурне оточення та його фізико-хімічні, зокрема нелінійнодинамічні властивості. Показовим, але не винятковим у цьому відношенні прикладом є ферменти та їхні комплекси, які по відношенню до субстрата є одночасно і специфічним реагентом, і специфічним середовищем реакції [44], причому втрата однієї з цих властивостей автоматично призводить до інактивації ферменту [29, 44].

8. Великий порівняно з типовими квазіжорсткими молекулами ангармонізм при колективному вібронному змішуванні електронних станів НК з необхідністю спричиняє термотропний мезогенезис останньої, який проявляється, зокрема, в теплофізичних дослідженнях [45]. Навіть при  $T \rightarrow 0$  гомогенна НК не є періодично-впорядкованою структурою — найм'якші ступені свободи основ і цукрових залишків виявляються трансляційно невпорядкованими, що проявляється у наявності залишкової ентропії  $|\Delta S| > 0$ . З ростом температури структурна невпорядкованість нарощується шляхом поетапного плавлення жорсткіших ступенів свободи. При цьому кількість термотропних мезофаз НК визначається топологією її ГППЕ, а природа цього явища зводиться по суті до втрати динамічної стійкості системи за рахунок розвитку в ній з ростом температури ангармонізму. У порівнянні з молекулярними кристалами, що складаються з квазіжорстких молекул, для яких відсутній ефект Яна-Теллера, і мають термотропні мезофаз

[46], для НК цей ефект проявляється значно рельєфніше і при помітно нижчих температурах. Саме квазіаморфність біополімерів, яку можна розглядати як результат своєрідної властивості — структурного захисту від повної кристалізації, потребує для свого адекватного опису застосування склоподібних структурно-динамічних моделей [47]. При цьому вимагає розширеного тлумачення й саме поняття «структура біополімера», яке вживається нині переважно в статичному контексті, запозиченому із класичної кристалографії.

9. Отримані в цій роботі висновки можуть бути якісно розповсюджені і на білки, оскільки бічні радикали амінокислот, що мають у своєму складі аміногрупу, є, як і нуклеозиди, стереохімічно нежорсткими ян-теллерівськими структурами [48]. На думку автора, серед усієї сукупності біополімерів макромолекули, для яких справджується адіабатичне наближення [8, 9], або взагалі відсутні, або ж їхня частка функціонально звужена до необхідного мінімуму (очевидно, такі білки використовуються для побудови найжорсткіших архітектурних елементів клітини [1]). Отже, для переважної більшості біополімерів — макромолекул з неадіабатичною електронною будовою — характерна функціонально важлива нелінійнодинамічна поведінка і пов'язані з нею фізико-хімічні властивості, зокрема локалізація електронних станів, для яких вібронний ангармонізм є вирішальним чинником.

10. Нині, як це не прикро констатувати, уявлення про первинні фізико-хімічні засади функціонально значущої висококооперативної нелінійнодинамічної поведінки біополімерів, у першу чергу — низькоенергетичної, перебувають на початковому етапі розвитку (див. наприклад [4, 31, 42] і наведену там бібліографію). Прогрес у цьому обнадійливому напрямку, з огляду на його непересічне біологічне значення, може бути досягнутий, на думку автора, шляхом міждисциплінарної консолідації зусиль для вивчення природи вібронних ефектів у різноманітних біомолекулярних системах, що послідовно ускладнюються, із застосуванням традиційних методичних підходів, які плідно використовуються при вивченні фазових переходів в органічних кристалах різної природи [41, 46, 49—51], фізико-хімічних властивостей невпорядкованих середовищ [52—54], динамічної поведінки молекулярних структур, яка детермінується виключно ангармонізмом [55, 56], часової впорядкованості молекулярних систем, спричиненої флуктуаціями [57] тощо, та розробки нових [58—62].

Д. Н. Говорун

Низкоенергетическое кооперативное поведение биополимеров обусловлено коллективными вибранными взаимодействиями

Резюме

На основании результатов собственных исследований стереохимической жесткости канонических нуклеотидных оснований и ее квантовохимической природы, а также литературных данных, в первую очередь, концепции вибранных взаимодействий (Берсукер, 1987), автор доказывает, что наименьшими структурными элементами — носителями кооперативных свойств нуклеиновых кислот (НК) являются нуклеозиды — ян-теллеровские молекулярные структуры, а низкоэнергетическое кооперативное поведение НК в целом определяется коллективизацией вибранных взаимодействий. Сделан ряд биологически значимых выводов. Наиболее важный из них состоит в том, что именно низкоэнергетические (т. е. такие, энергия которых сравнима с энергией тепловых флуктуаций при физиологических температурах) электронно-конформационные возбуждения НК, целесообразно иницированные тем или иным способом (резонансным или нерезонансным) путем вибрального управления — возмущения неадиабатического перемешивания электронных состояний, играют одну из первостепенных ролей в широком классе биологически важных процессов, органически опосредованных высокоспецифическими актами макромолекулярного распознавания.

D. M. Govorun

A low energy cooperative behaviour of biopolymers is determined by collective vibronic interactions

Summary

Based on results of his own investigations on stereochemical non-rigidity of canonical nucleotide bases and its quantum-chemical nature and on the literature data, first of all on the conception of vibronic interactions (Bersuker, 1987), author prove that the least structural elements, bearing of cooperative properties of nucleic acids (NA) are nucleosides — Jahn-Teller molecular structure, and low energy cooperative behaviour of NA is generally determined by a collectivization of vibronic interactions. A number of biologically significant conclusions was made. The most important of them consists in that just low energy (smaller than the energy of thermal fluctuations under physiological temperatures) electronic-conformational excitations of NA, directly initiated in some way (resonance or non-resonance) through vibronic operation by perturbation of non-adiabatic intermixing of electronic states play one of the paramount roles in various biologically important processes, which are organically caused by high specific acts of macromolecular recognition.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Франк Г. М. Клеточные структуры и функция клетки // Биофизика.—1970.—15, № 2.—С. 298—307.
2. Cooperative phenomena in biology / Ed. G. Karreman.—New York: Pergamon press, 1980.—543 p.
3. Конев С. В., Аксентьев С. Л., Черницкий Е. А. Кооперативные переходы белков в клетке.—Минск: Наука и техника, 1970.—204 с.
4. Франк-Каменецкий М. Д. Теоретические модели ДНК // Молекуляр. биология (Итоги науки и техники, т. 15).—М.: ВИНТИ, 1979.—С. 42—73.
5. Любченко Ю. А. Внутримолекулярное плавление ДНК: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук.—М.: ИМГ АН СССР, 1988.—52 с.

6. Ланбо Д. Ю., Фридман А. С. Теория плавления химически модифицированных ДНК, содержащих сшивки между цепями // Молекуляр. биология.—1995.—29, № 5.—С. 1064—1075.
7. Вайнштейн Э. Ф., Харитонов А. С. Наименьший статистический элемент при описании кооперативных систем // Биофизика.—1994.—39, № 6.—С. 1099—1100.
8. Берсукер И. Б., Полингер В. З. Вибронные взаимодействия в молекулах и кристаллах.—М.: Наука, 1983.—375 с.
9. Берсукер И. Б. Эффект Яна-Теллера и вибранные взаимодействия в современной химии.—М.: Наука, 1987.—344 с.
10. Говорун Д. М. Протогонна таутомерія нуклеотидних основ: новий погляд на стару проблему // Біополімери і клітка.—1997.—13, № 3.—С. 191—196.
11. Говорун Д. М. Структурна ізомерія азотистих основ: розрахунок методом AM1 // Там же.—№ 2.—С. 127—134.
12. Говорун Д. М., Данчук В. Д., Кондратюк І. В. та ін. Дзеркально-симетричні конформаційні стани канонічних нуклеотидних основ // Доповіді АН України.—1992.—№ 2.—С. 66—69.
13. Govorun D. N., Danchuk V. D., Kondratyuk I. V. et al. AM1 calculation of the nucleic acid bases structure and vibrational spectra // J. Mol. Struct.—1992.—237.—P. 99—103.
14. Говорун Д. М., Данчук В. Д., Кондратюк І. В. та ін. Про неплоскість та дипольну нестійкість канонічних нуклеотидних основ, метильованих по глікозидному азоту // Доповіді НАН України.—1995.—№ 6.—С. 117—119.
15. Говорун Д. М., Міщук Я. Р., Кондратюк І. В. Про квантовохімічну природу стереохімічної нежорсткості канонічних нуклеотидних основ // Біополімери і клітка.—1996.—12, № 5.—С. 5—12.
16. Говорун Д. М. Структурно-енергетичні особливості спонтанного дезамінування канонічних нуклеотидних основ та деяких їхніх модифікованих аналогів // Там же.—1997.—13, № 1.—С. 36—38.
17. Говорун Д. М., Міщук Я. Р., Кондратюк І. В., Желтовський М. В. Динамічна стереоізомерія Уотсон-Крікських пар нуклеотидних основ // Доповіді НАН України.—1995.—№ 11.—С. 121—123.
18. Говорун Д. М., Міщук Я. Р., Кондратюк І. В. Топологічні властивості гіперповерхні потенціальної енергії канонічних нуклеотидних основ // Біополімери і клітина.—1996.—12, № 5.—С. 13—17.
19. Міщук Я. Р. Вивчення фізико-хімічної природи елементарних актів білково-нуклеїнового та нуклеїново-нуклеїнового впізнавання на низькомолекулярних модельних системах: Автореф. дис. ... канд. біол. наук.—Київ: ІМБіГ АН України, 1993.—21 с.
20. Коломієць І. М. Вивчення специфічної взаємодії карбоксильної групи амінокислот з нуклеотидними основами, нуклеозидами та їхніми метилпохідними методами оптичної спектроскопії: Автореф. дис. ... канд. біол. наук.—Київ: ІМБіГ НАН України, 1996.—21 с.
21. Кондратюк І. В. Дослідження фізико-хімічної природи елементарних процесів молекулярного розпізнавання методами ЯМР, колиальної спектроскопії та комп'ютерного моделювання: Автореф. дис. ... канд. біол. наук.—Київ: ІМБіГ НАН України, 1996.—19 с.
22. Говорун Д. М., Кондратюк І. В. Анізотропія обертальної рухливості аміногрупи в канонічних нуклеотидних основах // Доповіді НАН України.—1996.—№ 10.—С. 152—155.
23. Ильичева И. А., Туманян В. Г., Дашевский В. Г. Конформационный анализ двуниевых полинуклеотидов // Молекуляр. биология (Итоги науки и техники, т.15).—М.: ВИНТИ, 1979.—С. 125—187.
24. Toyama A., Takito Y., Takeuchi H., Harada I. Ultraviolet

- resonance Raman spectra of ribosyl C(1')-deuterated purine nucleotides: evidence of vibrational coupling between purine and ribose rings // *J. Amer. Chem. Soc.*—1993.—115, N 4.—P. 11092—11098.
25. *Brahms S., Fritsch V., Brahms J. G., Westhof E.* Investigations on the dynamic structures of adenine- and thymine-containing DNA // *J. Mol. Biol.*—1992.—223, N 2.—P. 455—476.
  26. *Amidon G. L., Anik S., Rubin J.* An energy partitioning analysis of base-sugar intramolecular C-H...O hydrogen bonding in nucleosides and nucleotides // *Structure and conformation of nucleic acids and protein-nucleic acid interactions* / Ed. M. Sundaraingam, S. T. Rao.—Baltimore: Univ. Park press, 1975.—P. 729—744.
  27. *Lively N. N., Turema M. W., Shields G. C.* Hydrogen bonding of nucleotide base pairs: application of the PM3 method // *Int. J. Quant. Chem. and Quant. Biol. Symp.*—1994.—N 21.—P. 95—107.
  28. *Межмолекулярные взаимодействия: от двухатомных молекул до биополимеров* / Под. ред. А. М. Бродского.—М.: Мир, 1981.—414 с.
  29. *Кобозев Н. И.* Адсорбционные катализаторы и теория активных центров (очерк развития теории активных ансамблей и агрегации) // *Совр. пробл. физ. химии. Вопр. катализа, адсорбции и физ.-хим. механики.*—М.: Изд-во МГУ, 1968.—С. 3—60.
  30. *Летохов В. С., Рябов Е. А., Макаров А. А. и др.* Лазерная спектроскопия колебательно-возбужденных молекул.—М.: Наука, 1990.—278 с.
  31. *Якушевич Л. В.* Динамика ДНК // *Молекуляр. биология.*—1989.—23, № 3.—С. 652—662.
  32. *Burd F. J., Martell R. M., Dodgson J. V., Wells R. D.* Transmission of stability (telestability) in deoxyribonucleic acid // *J. Biol. Chem.*—1975.—250, N 13.—P. 5109—5113.
  33. *Блюменфельд Л. А., Гольданский В. И., Подгорецкий М. И., Чернавский Д. С.* Пространственная и временная локализация электронов в молекулярных системах и понятие сопряжения в химии // *Журн. структ. химии.*—1967.—8, № 5.—С. 854—863.
  34. *Восводский В. В., Блюменфельд Л. А.* О слабых взаимодействиях в органической химии // *Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева.*—1962.—7, № 4.—С. 457—461.
  35. *Брусков В. И., Полтев В. И.* Узнавание ферментами комплементарных пар азотистых оснований и усиление специфичности взаимодействий в процессах матричного синтеза // *Докл. АН СССР.*—1974.—219, № 1.—С. 231—233.
  36. *Брусков В. И.* Стереохимическое усиление специфичности в биологических системах узнавания // *Биофизика.*—1976.—21, № 5.—С. 812—816.
  37. *Лисица М. П.* Первичная рецепция миллиметровых волн в биосистемах // *Physics of the alive (Физика живого).*—1996.—4, № 1.—С. 40—55.
  38. *Малеев В. Я., Кашиур В. А.* О молекулярных механизмах взаимодействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с белками и ДНК. Теория и эксперимент // *Исследование взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами.*—Киев: Наук. думка, 1989.—С. 3—10.
  39. *Сериков А. А.* Молекулярные механизмы КВЧ биоэффекта // *Изв. вузов. Радиофизика.*—1994.—37, № 1.—С. 93—102.
  40. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации.—М.: Мир, 1979.—512 с.
  41. *Паташинский А. Э., Покровский В. Л.* Флуктуационная теория фазовых переходов.—М.: Наука, 1975.—255 с.
  42. *Рубин А. Б., Кононенко А. А., Шайтан К. В.* Электронно-конформационные взаимодействия в первичных процессах фотосинтеза // *Итоги науки и техники (Биофизика; т. 21).*—М.: ВИНТИ, 1987.—С. 3—161.
  43. *Роуз С.* Устройство памяти. От молекул к сознанию.—М.: Мир, 1995.—384 с.
  44. *Волькенштейн М. В.* Регуляция ферментами и регуляция ферментов // *Биофизика.*—1970.—15, № 2.—С. 215—224.
  45. *Мревлишвили Г. М.* Аперриодические структуры, фракталы и низкотемпературная теплоемкость биологических макромолекул // *Там же.*—1995.—40, № 3.—С. 485—496.
  46. *Першин В. К., Першин Вл. К., Зоркий П. М.* Мезофазы — молекулярные системы с частичным порядком: структура, механизмы образования, полиморфизм // *Пробл. кристаллохимии.*—М.: Наука, 1988.—С. 30—82.
  47. *Гольданский В. И.* Мессбауэровские исследования туннельных явлений в химической и биологической физике // *Успехи химии.*—1977.—56, № 10.—С. 1639—1658.
  48. *Говорун Д. М.* Структурно-динамична модель спонтанних напіррозкритих станів ДНК // *Биополимеры и клетка.*—1997.—13, № 1.—С. 39—45.
  49. *Зоркий П. М.* Новый взгляд на стрессные органического кристалла // *Журн. физ. химии.*—1994.—68, № 6.—С. 966—974.
  50. *Квятковский О. Е., Максимов Е. Г.* Микроскопическая теория динамики решетки и природа сегнетоэлектрической неустойчивости в кристаллах // *Успехи физ. наук.*—1988.—154, № 1.—С. 3—48.
  51. *Браун Г., Уолкен Дж.* Жидкие кристаллы и биологические структуры.—М.: Мир, 1982.—198 с.
  52. *Малиновский В. К., Новиков В. Н., Соколов А. П.* О наноструктуре неупорядоченных тел // *Успехи физ. наук.*—1993.—163, № 5.—С. 119—124.
  53. *Клингер М. И.* Низкотемпературные свойства и локализованные электронные состояния стекол // *Там же.*—1987.—152, № 4.—С. 623—652.
  54. *Смоляков Б. П., Хаймович Е. П.* Динамические процессы в диэлектрических стеклах при низких температурах // *Там же.*—1982.—136, № 2.—С. 317—343.
  55. *Давыдов А. С.* Солитоны в молекулярных системах.—Киев: Наук. думка, 1988.—303 с.
  56. *Овчинников А. А., Эрихман Н. С.* О локализации колебательной энергии при высоких уровнях возбуждения. Колебательные экситоны // *Успехи физ. наук.*—1982.—138, № 2.—С. 289—320.
  57. *Чалый А. В.* Методы теории фазовых переходов в проблеме структурообразования // *Теор. и мат. аспекты морфогенеза.*—М.: Наука, 1987.—С. 245—255.
  58. *Єремко О. О.* Самоутожджені стани квазічастинок та деформації ґратки в одновимірних молекулярних системах: Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук.—Київ: ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України, 1996.—45 с.
  59. *Вильсон К., Когут Дж.* Ренормализационная группа и  $\epsilon$ -разложение.—М.: Мир, 1975.—302 с.
  60. *Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и ее приложения.—М.: Мир, 1980.—421 с.
  61. *Чаки Ф.* Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы.—М.: Мир, 1975.
  62. *Кальнин А. А.* О возможности распределенной кодовой записи сигналов в неравновесных кооперативных системах (структурная рефлексия) // *Биофизика.*—1984.—29, № 1.—С. 117—121.