

ДЛЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

УДК 577.32 :537.662

**МАГНІТОВПОРЯДКОВАНІ СПОЛУКИ ЕНДОГЕННОГО ЗАЛІЗА І ПРОБЛЕМА
ВПЛИВУ ПОСТІЙНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА БІОСИСТЕМИ****В.Ф.Чехун, С.В.Горобець, О.Ю. Горобець**

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, pitbm@ukr.net*

Надійшла до редакції 11 жовтня 2010 р.

Прийнята 17 листопада 2010 р.

В огляді зроблено аналіз форм існування магнітвпорядкованих структур сполук ендogenous заліза в клітинах живих організмів, зокрема у викопних залишках та мікроорганізмах, а також фізіологічного значення таких феримагнітних матеріалів. Описано спроби дослідити зв'язок між кількістю ендogenous феритових наночастинок та їх фізико-хімічними властивостями, а також експресію феритина в клітинах в нормі, патології та в процесі старіння. Досліджено механізми впливу постійного магнітного поля на біосистеми. Зроблено оцінки і показано, що градієнт магнітного поля, створеного самою феритовою наночастиною в клітині, на декілька порядків більше градієнтів, що досягаються в експериментальних дослідженнях і, таким чином, власне магнітне поле ендogenous феритових наночастинок і пов'язані з ним магнетохімічні ефекти можуть бути додатковим немеханічним чинником впливу на процеси переносу, дифузії та електричні потенціали в клітині.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ендogenous залізо, магнітосоми, магніточутливі структури, наночастинок магнетиту, магнітне поле.

**MAGNETICALLY ORDERED STRUCTURES OF ENDOGENOUS IRON AND THE PROBLEM
OF THE EFFECT OF STEADY MAGNETIC FIELDS ON BIOLOGICAL SYSTEMS****V.F. Tchekhun, S.V. Gorobets, O.Yu. Gorobets**

National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute", 37 Prospect Peremogy, Kiev 03056, Ukraine
Analysis of forms of magnetically ordered structures of endogenous iron in cells of alive organisms is analyzed in this paper. In particular, fossils and microorganisms and phylogenetic meaning of such ferrimagnetic materials are considered. The attempts of investigation of correlation between change of quantity of endogenous ferrite nanoparticles, and their physicochemical properties and ferritin expression in normal, pathology cells and with aging. Mechanisms of permanent magnetic field influence on biosystems are mentioned. The estimations are carried out and it is shown that the magnetic field gradient of ferrite nanoparticle in a cell is several orders of magnitude greater than the gradients achieved in the experimental investigations. By the way the proper magnetic field of endogenous ferrite nanoparticles and corresponding magnetochemical effects can be additional (non mechanical) factors of influence on transport phenomena, diffusion and electric potentials in cells.

KEY WORDS: endogenous iron, magnetosomes, magnetically sensitive structures, magnetite nanoparticles, magnetic field.

**МАГНІТОУПОРЯДОЧЕННІ СПОЛУКИ ЕНДОГЕННОГО ЖЕЛЕЗА І ПРОБЛЕМА
ВЛИВАННЯ ПОСТІЙНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА БІОСИСТЕМИ****В.Ф.Чехун, С.В.Горобець, О.Ю. Горобець**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37

В обзорі зроблено аналіз форм існування магнітоупорядкованих структур сполук заліза в клітинах живих організмів, зокрема в ископаємих залишках та мікроорганізмах, а також фізіологічного значення таких феримагнітних матеріалів. Описано спроби дослідити зв'язок між кількістю ендogenous феритових наночастинок та їх фізико-хімічними властивостями, а також експресію феритина в клітинах в нормі, патології та в процесі старіння. Досліджено механізми впливу постійного магнітного поля на біосистеми. Зроблено оцінки і показано, що градієнт магнітного поля, створеного самою феритовою наночастиною в клітині, на декілька порядків більше градієнтів, які досягаються в експериментальних дослідженнях і, таким чином, власне магнітне поле ендogenous феритових наночастинок і пов'язані з ним магнетохімічні ефекти можуть бути додатковим немеханічним фактором впливу на процеси переносу, дифузії та електричні потенціали в клітині.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ендogenous залізо, магнітосоми, магніточутливі структури, наночастинок магнетиту, магнітне поле.

Магнітосоми та магніточутливі системи (МЧС) в магнітотаксисних бактеріях.

Відомо, що до складу живих організмів, у тому числі і мікроорганізмів (бактерій, дріжджів, грибів і тощо), входять сполуки, що відносяться до різних магнітних класів: діа-, пара-, феро-, антиферо- та феримагнетиків (феритів). Причому феро-, антиферо- та феримагнетики є магнітовпорядкованими речовинами. Відсоткове співвідношення речовин і елементів із різними магнітними властивостями визначає ступінь відгуку самих біологічних об'єктів на зовнішнє магнітне поле. Тому і серед мікроорганізмів виділяють як парамагнітні види, так і діамагнітні [1, 2]. Магнітні властивості мікроорганізмів залежать також від інтенсивності і спрямованості ряду реакцій обміну речовин [3]. Так, у мертвих клітин відбувається зростання діамагнітності у порівнянні з живими [4], також магнітна сприйнятливість мікроорганізмів залежить від їх віку та впливу зовнішніх факторів [5, 6].

Також найбільшою магнітною сприйнятливістю відрізняються біосистеми, що накопичують у своєму складі магнітовпорядковані сполуки, зокрема магнетит (Fe_3O_4) [7-14]. Так, у 1975 році в складі ряду прокариот [7,8] було виявлено внутрішньоклітинний магнетит у вигляді кристалічних утворень, що називаються магнітосомами і складають ланцюжки з десятків окремих гранул, кожна з яких вкрита оболонкою. Кількість гранул у ланцюжку й їхні розміри (від 10 до 40 нм, за іншими даними - від 35 до 120 нм [9]) відповідають визначеному виду бактерій. Також виявлено, що ці гранули розташовані уздовж осі бактерії, зазвичай на стороні джгутика, або пучка джгутиків, тобто біля органу руху клітини. За існуючими гіпотезами завдяки магнетитовим ланцюжкам ці бактерії спроможні до орієнтованого руху в геомагнітному полі Землі, іншими словами - бактерії мають властивості магнітного тропізму й одержали назву магнітотаксисних або магнітотропних, застосовують також термін "магнітні" бактерії. Відкриття магнетиту в клітинах бактерій, а також можливість позаклітинного синтезу цього матеріалу за обов'язкової бактеріальної участі поставило перед мікробіологами таке питання: яке фізіологічне значення цього феримагнітного матеріалу? [8]. Очевидно, частково на ці питання дає відповідь відкриття інших, більш поширених в мікробному світі магнітотаксисних структур (МЧС) [10-16]. МЧС має некристалічну гетерогенну організацію і складається з органічного "ядра" і збагаченого залізом матриксу. МЧС було виявлено в клітинах багатьох архіальних (архібактеріальних) і бактеріальних організмів. Представники різних фізіологічних груп, у тому числі патогенні бактерії (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*), спроможні утворювати МЧС під час культивування як на синтетичних, так і на кров'яних середовищах. У клітинах мікроорганізмів можливі два морфотипи локалізації МЧС – уздовж довгої осі клітини й уздовж клітинної оболонки. І клітини з МЧС, і виділені МЧС у разі дії на них постійним магнітом (0,4 - 2,0 Тл) рухаються в напрямку збільшення магнітного поля [10]. Всі ці МЧС подібні за своєю природою і принципово відрізняються від кристалічних мінеральних магнітних включень (магнітосом). Вони також забезпечують виражений орієнтований рух клітин у геомагнітному полі. У цих самих роботах [10-16] відзначається, що, можливо, не тільки прокариотні клітини містять МЧС, а й еукаріотні також, що може говорити на користь єдності біохімічних шляхів утворення магнітних структур у прокариотних і еукаріотних організмів. Зрозуміло, що відкриття принципово нових за будовою магнітотаксисних структур говорить про те, що таке їхнє розмаїття не може бути призначене лише для орієнтованого руху в геомагнітному полі Землі. У роботах [10-16], висувається гіпотеза, що магнітосоми та МЧС виконують декілька призначень: не тільки визначають напрямок руху бактерій уздовж силових ліній магнітного поля, але й постачають клітину додатковою енергією.

У зв'язку з тим, що кількість видів прокариот, в яких виявлено МЧС, постійно розширюється, то пояснення їх функціональної ролі є дуже актуальним.

Біогенні феритові наночастки в тканинах багатоклітинних організмів.

Більш пізні дослідження продемонстрували, що в багатьох організмах є дуже поширеним біохімічний синтез не тільки біогенного магнетиту, а й інших феримагнітних сполук заліза, таких як магеміт ($\gamma - Fe_3O_4$) [14,15,17-21] та грейгіт (Fe_3S_4), який має магнітний момент втричі менший за магнетит [22,23]. Біомінералізований магнетит виявлено у викопних залишках організмів, що датуються, починаючи з Прекамбійської ери [24], молюсках [19], членистоногих [20], рибах [22], тваринах [19-22,24], в тканинах мозку [27-30] та інших органах людини [29]. Зокрема, біогенний магнетит знайдено в тканинах і органах акул, дельфінів, багатьох перелітних птахів, равликів, шершнів, бджіл і т. ін. [8, 24, 30].

Так, в роботі [25] з використанням ультрачутливого надпровідного магнітометра було показано, що феритові наночастки (магнетит та магеміт) є в складі багатьох тканин мозку людини в кількості від 5 до 100 мільйонів нанорозмірних кристалів на грам м'якої та твердої мозкових оболонок. Розподіл цих часток за розмірами має два максимуми: в околі малих часток із середнім розміром 33.4 ± 15.2 нм, які збираються в групи по 50 – 100 штук, а також максимум в діапазоні розмірів від 90 нм до 200 нм. Перехід від суперпарамагнітного до однодоменного стану для магнетиту відбувається в діапазоні розмірів наночасток від 25 нм до 30 нм [31], тому в мозку людини присутні як суперпарамагнітна, так і однодоменна компонента.

Незважаючи на інтенсивні дослідження властивостей ендogenous феритових наночасток, їх фізіологічне походження та функціональне призначення в багатоклітинних організмах на цей час залишається відкритим питанням.

Антиферомагнітні наночастки в складі залізовмісних білків.

Як відомо, феритин є одним із внутрішньоклітинних залізовмісних білків, що міститься в кожній клітині, і є одним із основних білків в метаболізмі заліза [32]. Він складається із сферичної білкової оболонки діаметром 12 нм, і ядра із антиферомагнітного гідрату окису заліза ($5Fe_3O_4 \cdot 9H_2O$) діаметром 8 нм [33, 34]. Незважаючи на чисельні дослідження, точна структура і морфологія цього ядра залишається суперечливою [35]. Згідно з найбільш сучасними дослідженнями [35] вважається, що ядро феритина складається із максимум восьми субодиниць, сумісних із восьма каналами в білковій оболонці, що постачають залізо в центральну порожнину. Всередині ядра малі (близько 2 нм) субодиниці гідрату окису заліза з'єднані таким чином, що залишається центральна область з невеликою густиною і великою площею поверхні, щоб забезпечити швидкий обіг заліза в біологічних системах. Також аналіз окремих ядер за допомогою трансмісійної електронної мікроскопії та нанодифракції електронів показав, що окремі ядра складаються з однієї із декількох можливих неорганічних фаз: антиферомагнітного гідрату окису заліза – в більшості ядер або феримагнітного магнетиту [36-38]. Оскільки магнетит включає в себе обидва типи Fe^{+3} та Fe^{+2} іонів заліза, за певних умов окислювально-відновлюваний цикл може відбуватися навіть всередині феритина [35]. Однак, ці твердження не є абсолютно достовірними, оскільки існує думка, що у разі опромінення гідрату окису заліза пучком електронів в процесі вимірювання може відбуватися його перетворення на магнетит. На думку авторів даного огляду магнітна силова мікроскопія могла б бути альтернативним

методом для перевірки результатів робіт [36-38], тому що вона дає змогу відрізнити антиферомагнітну фазу гідрату окису заліза від феримагнітної фази магнетиту, не змінюючи фізико-хімічних властивостей досліджуваних зразків.

Залізовмісні білки як попередники синтезу феритових наночасток.

В роботах [37, 39] було висунуто припущення про те, що фізіологічний і патологічний феритин в мозку людини може бути попередником для часток магнетиту (магеміту) з розмірами достатньо великими, щоб мати залишкову намагніченість за кімнатних температур. Крім того, в роботі [40] в продовження цієї ідеї на основі виявленого широкого розподілу по розмірах феритових наночасток в тканинах мозку людини було сформульовано гіпотезу про те, що ріст ендogenous феритових наночасток починається з нанометрових розмірів, і різні стадії росту детектуються в усіх зразках тканин.

Зміна експресії залізовмісних білків, кількості та властивостей магнітовпорядкованих сполук ендogenous заліза в патологічно змінених тканинах.

В пошуках відповіді на питання про механізми утворення та функції ендogenous феритових наночасток в ряді робіт досліджується зв'язок між зміною їх кількості та фізико-хімічних властивостей в клітинах в нормі, патології та в процесі старіння. При цьому досліджується також кореляція між експресією феритина та концентрацією феритових наночасток.

В роботах [41, 42] показано, що експресія феритина збільшується при старінні організму. Також аномалії в експресії феритина спостерігаються для багатьох типів раку, що детально проаналізовано в роботі [43].

Роль сильно феримагнітного ендogenous магнетиту при нейрологічних та нейродегенеративних захворюваннях, таких як хвороба Альцгеймера та епілепсія, досліджувалась в роботах [44-47].

В роботі [40] показано, що в пухлинній тканині мозку людини приблизно в 10 разів більше наночасток магнетиту, ніж в непухлинній. При цьому швидкість утворення ендogenous наночасток магнетиту (і/або магеміту) виявилася більшою в пухлинній тканині, оскільки розміри наночасток в здоровій тканині гіпокампа є меншими, ніж в пухлині м'якої мозкової оболонки, де умови можуть бути більш сприятливими для росту більших часток [40]. Ці дані підтверджують ідею, що феритин є попередником утворення магнетиту або магеміту. Крім того, авторами роботи [40] відмічено, що кількість крові в пухлині м'якої мозкової оболонки є в середньому більшою, ніж у здоровій тканині гіпокампа. Проте не знайдено взаємозв'язку між постачанням тканини кров'ю та формуванням магнетиту і/або магеміту. Не виявлено також зміни кількості зазначених феритових ендogenous наночасток зі збільшенням віку організму, що не корелює з даними по експресії феритина при старінні [41, 42].

Механізми впливу постійного магнітного поля на біосистеми.

В напрямку дослідження впливу магнітних полів на біосистеми накопичено велику кількість експериментального матеріалу. Всі ці роботи єдині в одному, що практично не існує біосистем, на які магнітні поля не мають ніякого впливу, хоча всі аспекти механізмів цього впливу ще не з'ясовано. Найважливіше значення для вивчення цієї проблеми мають дослідження процесів і механізмів дії магнітного поля на структуру і функції живих організмів різних рівнів складності. Це є однією з важливих проблем

сучасної біофізики, тим більше, що виникнення магнітобіологічних ефектів у біосистемах повинно розглядатися як постійно присутній екологічний чинник, що має таке саме значення в життєдіяльності живих організмів, як температура, вологість, тиск та інші природні фактори, оскільки не викликає сумнівів той факт, що природний електромагнітний фон Землі є необхідною умовою для нормальної життєдіяльності біосистем. Вивчення впливу магнітних полів на біосистеми сприяло появі і розвитку таких наук, як магнітобіологія, магнітохімія, біофізика та ін. Так, в експериментах найчастіше використовуються значення індукції магнітних полів, які з теоретичної точки зору є слабкими і не повинні приводити до помітних ефектів. Ситуація ускладнюється ще й тим, що більшість експериментів ставиться на рівні обробки середовища або організму в цілому (включаючи мікроорганізми), а для з'ясування механізму впливу магнітних полів (МП) на біосистеми важливо вивчення кількісного впливу магнітних полів [48-52] на окремі структури і біологічні функції організмів або мікроорганізмів.

На цей час розроблено близько півтора десятка моделей впливу магнітного поля на біосистеми, які систематизовано в роботі [53]. Більшість із них стосується слабких змінних магнітних полів. Щодо постійних магнітних полів, то механізми їх впливу на механічні частки в сипучих, рідких і газоподібних середовищах вивчено достатньо глибоко. Створено та підтверджено експериментально теорії, що пояснюють рух, сепарацію та «захоплення» діа-, пара-, феро-, антиферо- та феримагнітних часток під впливом просторово неоднорідного (іншими словами градієнтного) і постійного в часі магнітного поля. В цьому зв'язку необхідно відмітити, що вплив магнітного поля на пара- і діаманітні речовини на 3 – 6 порядків величини менший, ніж на магнітовпорядковані речовини, такі як феромагнетики і ферити. Проте раніше панувала думка, що спеціалізованих магніторецепторів (феро- та феримагнетиків), окрім частинок біомагнетиту в деяких бактеріях, в живих організмах не існує, і тому вважалося важливим зрозуміти, яким чином сигнал магнітного поля трансформується у відгук біологічної системи [53]. Однак, після виявлення біогенних феритових часток в організмі людини та в зв'язку зі значною розповсюдженістю використання ЯМР в медицині проблема безпеки сильних магнітних полів (більше 3 Тл) набула актуальності. В експериментальних і теоретичних дослідженнях [54-56] показано, що сили, які діють на біогенні наночастки магнетиту в магнітному полі, мають потенціал до руйнування або зміни функціонування іонних каналів в клітині. Це може призводити до впливу на експресію білків та функцію клітини. [57, 58]. Але автори роботи [59] вважають, що в магнітних полях навіть 9,4 Тл мало ймовірно порушення нормального функціонування клітини через збудження наночасток біогенного магнетиту. Особливістю підходу в цих роботах [54-59] є врахування можливого тільки механічного ушкодження клітин внаслідок руху наночасток магнетиту в неоднорідному постійному зовнішньому магнітному полі. Існує гіпотеза [43], що низькомолекулярні комплекси заліза можуть призводити до формування вільних радикалів і мати токсичний вплив.

Але на думку авторів даного огляду не менш важливо враховувати наявність високоградієнтного магнітного поля, створеного самою феритовою наночасткою. Існування власного магнітного поля частинки під час перебігу електрохімічних реакцій за певних умов призводить в її околі до зміни типу масопереносу з дифузійного на конвективний, до зміни швидкості електрохімічних перетворень, до самоорганізованого утворення фаз з різними магнітними сприйнятливостями та іонним складом, до виникнення електричної різниці потенціалів між областями поверхні частинки з різною величиною утвореного навколо неї магнітного поля [60-70]. Дійсно, нескладно порівняти силу, що діє на парамагнітні іони у водному розчині електроліту в

околі феромагнітних часток в роботах [65-70] з силою, що діє на парамагнітні іони в околі феритової наночастки в клітині у зовнішньому магнітному полі:

$$F = \chi \text{grad} H^2,$$

де χ - магнітна сприйнятливість іона, H - суперпозиція зовнішнього магнітного поля та магнітного поля, створеного намагніченою часткою.

Для оцінки замінимо оператор grad на $1/a$, де a - характерний розмір частки, що створює магнітне поле.

В експериментальних дослідженнях [65-70]:

$H = 1000 \text{ E}$, $a \approx 10 \div 1000 \text{ мкм}$,

$\frac{H^2}{a} \approx \frac{(1000)^2}{a}$ змінюється в інтервалі від 10^9 до $10^7 \text{ E}^2/\text{см}$.

Клітина ж містить магнетит у формі кристалів Fe_3O_4 , що є феримагнетиком і може створювати власне магнітне поле порядку 1000 E . Розміри цих часток у клітині, як вже зазначалося, знаходяться в межах від 10 до 40 нм (від $10^{-6} \div 10^{-5} \text{ см}$) [7, 17].

Отже, навколо феритової наночастки в клітині $\frac{H^2}{a} \approx 10^{12} \div 10^{11} \text{ E}^2/\text{см}$, що на декілька порядків більше градієнтів, що досягаються в експериментальних дослідженнях, проведених в роботах [65-70]. Таким чином, власне магнітне поле ендогенних феритових наночасток і пов'язані з ним вищезазначені магнетохімічні ефекти можуть бути додатковим немеханічним чинником впливу на процеси переносу, дифузії та електричні потенціали в клітині.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pavlovich S.A. Magnitochuvstvitel'nost' i magnitovospriimchivost' mikroorganizmov // Minsk: Belarus' – 1981. – P. 130.
2. Chervinets V.M., Novitskiy Yu., Pavlovich S.A. Magnitnaya vospriimchivost' mikroorganizmov // Zhurnal gigieny, epidemiologii, mikrobiologii i immunologii. – 1979. – V.23, N3. – P. 230 – 233.
3. Verhovtseva N.V., Glebova I.N. Osobennosti nakopleniya zheleza bakteriyami po dannym magnitnyh izmereniy // Biofizika. – 1993. – V.38, N1. – P. 150 – 154.
4. Shalygin A.N., Norina S.B., Kondorskiy E.N. Magnitnaya vospriimchivost' i magnitnyj “zahvat” kletok // Biofizika. – 1984. – V.29, N5 – P.845 – 851.
5. Zholkevich V.N., Volkov D.I., Prudnikov S.A. // Dokl AN SSSR. – 1971. – 197, N5. – P. 1210.
6. Novitskiy Yu.I. Magnitnoe pole v meditsine // Frunze: Ilim. – 1974. – P. 136.
7. Blakemore R.P. Magnetotactic bacteria // Science. – 1975. – 190. – P. 377–379.
8. Verhovtseva N.V. Obrazovanie bakteriyami magnetita i magnitotaksis // Uspehi mikrobiologii. – 1992. – 25. – P. 51–79.
9. Dennis A. Bazylnski. Controlled biomineralisation of magnetic minerals by magnetotactic bacteria // Chemical Geology Elsevier. – V.132, I. 1-4. – 1996. – P. 191-198.
10. Vaynshteyn M.B., Suzina N.E., Sorokin E.B. K raznoobraziyu magnitotaktnykh bakteriy // Mikrobiologiya. – 1998. – 67, N6. – P. 807–814.
11. Nishio H., Takahashi T. Magnetic Characterization of Bacterial Magnetic Particles // Journal de Physique. – V.4. – 1997. – P. 663–666.
12. Schuler D., Baeuerlein E. Iron Transport and Magnetite Crystal Formation of the Magnetic Bacterium *Magnetospirillum gryphiswaldense* // Journal de Physique. – V.4. – 1997. – P. 647–650.
13. Verhovtseva N.V. Transformatsiya soedineniy zheleza geterotrofnymi bakteriyami // Mikrobiologiya. – 1995. – 64, N4. – P. 473–478.
14. Frankel R. B., Blakemore R.P., Wolfe R.S. Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria // Science. – 1979. – 203. – P. 1355–1356.
15. Torres de Araujo F.F., Pires M.A., Frankel R.B., Bicudo C.E.M. Magnetite and Magnetotaxis in Algae // Biophys. J. – 1985. – 50. – P. 375–378.
16. Vainshtein M.B., Suzina N.E., Sorokin V.V. A new type of magnetsensitive inclusions in cells of photosynthetic purple bacteria // Syst. Appl. Microbiol. – 1997. – 20. – P. 182–186.
17. Lowenstam H.A. Magnetite in denticle capping in recent chitons // Geol. Soc. Am. Bull. – 1, N.2. – 1973. – P. 435–438.

18. Gould J.L., Kirschvink J.L., Deffeyes K.S. Bees have magnetic remanence // *Science*. – 1978. – N.202. – P.1026-1028.
19. Walcott C., Gould J.L., Kirschvink J.L. Pigeons have magnets // *Science*. – 1979. – N.184. – P. 180–182.
20. Mann S., Sparks N.H.C., Walker M.M., Kirschvink J.L. Ultrastructure, morphology and organization of biogenic magnetite from sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*: Implications for magnetoreception // *J. Exp. Biol.* – 1988. – 140. – P. 35–49.
21. Kirschvink J.L., Jones D.S., MacFadden B.J. Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: A New Biomagnetism // Plenum, New York. – 1985.
22. Heywood D.R., Bazylinski D.A., Garrattreed A., Mann S., Frankel R.B. Controlled Biomineralization of Magnetite (Fe₃O₄) and Greigite (Fe₃S₄) in a Magnetotactic Bacterium *Naturwissenschaften*. – 1990. – 77. – P. 536–538.
23. Cat Faber, Living Lodestones: Magnetotactic bacteria // *Strange Horizons*. – 2001. – V. 7. – P. 2. /www.strangehorizons.com/2001/20010702/living_lodestone.shtml.
24. Chang S.R., Kirschvink J.L. Magnetofossils, the magnetization of sediments, and the evolution of magnetite biomineralisation // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* – 1989. – 17. – P. 169–195.
25. Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink A., Woodford B.J. Magnetite biomineralization in the human brain // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. – 1992. – 89. – P. 7683–7687.
26. Dunn J.R., Fuller M., Zoeger J., Dobson J.P., Heller F., Caine E., Moskowitz B.M. Magnetic material in the human hippocampus // *Brain Res. Bull.*, – 1995. – 36. – P. 149–153.
27. Dobson J.P., Fuller M., Moser S., Wieser H.G., Dunn J.R., Zoeger J. Vocation of epileptiform activity by weak D.C. magnetic fields and iron biomineralization in the human brain // In: *Biomagnetism: Fundamental Research and Applications*, Elsevier, Amsterdam: – 1995. – P. 16–19.
28. Dobson J.P., Grassi P. Magnetic Properties of Human Hippocampal Tissue. Evaluation of Artefact and Contamination Sources // *Brain Res. Bull.* – 1996. – 39. – P. 255–259.
29. Schultheiss-Grassi P.P., Heller F., Dobson J. Analysis of magnetic material in the human heart, spleen and liver // *BioMetals*. – 1997. – 10. – P. 351–355.
30. Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение // Под ред. Ф. Херлаха. – М.: Мир. – 1988.
31. Morales M. P., Veintemillas-Verdaguer S., Montero M. I., Serna C. J., Roig A., Casas L., Martinez B., Sandiumenge F. Surface and internal spin canting in gamma-Fe₂O₃ nanoparticles // *Chem. Mat.* – 1999. – 11. – P. 3058–3064.
32. Arosio P., Levi S. Ferritin, iron homeostasis, and oxidative damage. *Free Radic. // Biol Med.* – 2002. – 33. – P. 457–463.
33. Chasteen N.D., Harrison P.M. Mineralization in ferritin: an efficient means of iron storage. // *J. Struct. Biol.* – 1999. – 126. – P. 182–194.
34. Harrison P.M., Arosio P. Ferritins: molecular properties, iron storage function and cellular regulation. *Biochim. // Biophys. Acta Bioenerg.* – 1996. – 1275. – P. 161–203.
35. Pana Y.-H., Sadara K., Powell J.J. et al. 3D morphology of the human hepatic ferritin mineral core: New evidence for a subunit structure revealed by single particle analysis of HAADF-STEM images // *J Struct Biol.* – 2009. – 166, №1. – P. 22–31.
36. Cowley J.M., Janney D.E., Gerkin R.C., Buseck P.R. The structure of ferritin cores determined by electron nanodiffraction // *J. Struct. Biol.* – 2000. – 131. – P. 210–216.
37. Quintana C., Cowley J.M., Marhic C. Electron nanodiffraction and high-resolution electron microscopy studies of the structure and composition of physiological and pathological ferritin // *J. Struct. Biol.* – 2004. – 147. – P. 166–178.
38. Quintana C., Lancin M., Marhic C., Perez M., Martin-Benito J., Avila J., Carrascosa J.L. Initial studies with high resolution TEM and electron energy loss spectroscopy studies of ferritin cores extracted from brains of patients with progressive supranuclear palsy and Alzheimer disease // *Cell. Mol. Biol.* – 2000. – 46. – P. 807–820.
39. Dobson J. Nanoscale biogenic iron oxides and neurodegenerative disease // *FEBS Lett.* – 2001. – 496. – P. 1–5.
40. Brem F, Hirt A.M., Winklhofer M., Frei K., Yonekawa Y., Weiser H.-G., Dobson J. Magnetic iron compounds in the human brain: a comparison of tumour and hippocampal tissue // *Journal of the Royal Society Interface.* – 2006. – 3. – P. 833-841.
41. Burdo J.R., Connor J.R. Brain iron uptake and homeostatic mechanisms: an overview // *Biometals*. – 2003. – 16. – P. 63–75.
42. Bartzokis G., Tishler T.A., Shin I.S. et al. Brain ferritin iron as a risk factor for age at onset in neurodegenerative diseases // *Acad. Sci.* – 2004. – 1012. – P. 224–236.
43. Chehun V.F., Shpilevskaya S.I. Rol' endogenous zheleza v formirovanii chuvstvitel'nosti k protivopuholevoy terapii // *Voprosy onkologii*. – 2010. – V. 56 N. 3. – P.251–261

44. Quintana C., Bellefqih S., Laval J.Y. et al. Study of the localization of iron, ferritin and hemosiderin in Alzheimer's disease hippocampus by analytical microscopy at the subcellular level // *J. Struct. Biol.* – 2006. – 153. – P. 42–54.
45. Fuller M., Dobson J., Wieser H.G., Moser S. On the sensitivity of the human brain to magnetic-fields—evocation of epileptiform activity // *Brain Res. Bull.* – 1995. – 36. – P. 155–159.
46. Schultheiss-Grassi P.P., Dobson J. Magnetic analysis of human brain tissue // *Biometals.* – 1999. – 12. – 67–72.
47. Hautot D., Pankhurst Q.A., Khan N., Dobson J. Preliminary evaluation of nanoscale biogenic magnetite in Alzheimer's disease brain tissue // *Proc. R. Soc. B.* – 2003. – 270. – P.62–S64.
48. Makarevich A.V. Vliyanie magnitnyh poley magnitoplastov na protsessy rosta mikroorganizmov // *Biofizika.* – 1999. – 44, N1. – P. 70–74.
49. Litvinov G.S., Polischuk V.P., Boyko A.L. Izmenenie struktury i biologicheskikh svoystv bakteriofaga pod vozdeystviem postoyannogo magnitnogo polya // *M.: Biopolimery i kletka.* – 1992. – 8, N1. – P. 46–51.
50. Boyko A.L., Shved A.D., Grigoryan Yu.A. Vpliv postiyonogo magnitnogo polya na virus tyutyunovoi mozaiki // *Visn. AN URSSR.* – 1975. – N8. – P. 26–31.
51. Nemeč N., Horacova D., Svazil P. Changes in the growth of staphylophage 812 induced by a homogeneous magnetic field // *Folia Fac. Sci. Nat. Univ. Puck Brun.* – 1983. – №24. – P. 73–85.
52. Mare G., Dransfel'd K. Biomolekuly i polimery v sil'nykh postoyannykh magnitnykh polyah // *Sil'nye i sverhsil'nye magnitnye polya i ih primeneniya* // *M.: Mir.* – 1988. – P. 180–254.
53. Bingi V.N., Savin A.V. Fizicheskie problemy deystviya slabih magnitnykh poley na biosistemy // *UFN.* – 173, N 3. – P. 265–300.
54. Kirschvink J.L. Comments on “Constraints on biological effects of weak extremely-low-frequency electromagnetic fields” // *Phys Rev A.* – 1992. – 46. – P. 2178–2184.
55. Dobson J. Remote control of cellular behavior with magnetic nanoparticles // *Nature Nanotechnology.* – 2008. – 3. – P. 139–143.
56. Dobson J., St. Pierre T.G. Application of the Ferromagnetic Transduction Model to D.C. and Pulsed Magnetic Fields: Effects on Epileptogenic Tissue and Implications for Cellular Phone Safety // *Biochem Biophys Res Commun.* – 1996. – 227. – P. 718–723.
57. Cartmell S.H., Dobson J., Verschueren S., El Haj A. Development of magnetic particle techniques for long-term culture of bone cells with intermittent mechanical activation // *IEEE Transactions on NanoBioscience.* – 2002. – 1. – P. 92–97.
58. Dobson J., Cartmell S.H., Keramane A., El Haj A.J. A magnetic force mechanical conditioning bioreactor for tissue engineering, stem cell conditioning and dynamic in vitro screening // *IEEE Trans NanoBiosci.* – 2006. – 5. – P. 173–177.
59. Dobson J., Bowtell R., Garcia-Prieto A., Pankhurst Q. Safety Implications of High-Field MRI: Actuation of Endogenous Magnetic Iron Oxides in the Human Body // *PLoS ONE.* – 2009. – 4, №5. – P. 1–3.
60. Tacken R.A., Janssen L.J.J. Applications of Magneto-electrolysis // *Journal of Applied Electrochemistry.* – 1995. – 25, – P. 1-5.
61. Fahidy T.Z. Magneto-electrolysis // *Journal of Applied Electrochemistry.* – 1983. – 13. – P. 553–563,
62. Waskaas M., Kharkats Y.I. Magnetoconvection Phenomena: a Mechanism for Influence of Magnetic Fields on Electrochemical Processes // *Journal of Physical Chemistry.* - 1999. – 103B, P. 4876-4883,
63. Aogaki R. Magnetic Field Effects in Electrochemistry // *Magneto-hydrodynamics.* – 2001. – 37, № 1/2. – P. 143–150,
64. Coey J.M.D., Hinds G., Lyons M.E.G. Magnetic Field Effects on Fractal Electrodeposits // *Europhysics Letters.* – 1999. – 47. – P. 267–272,
65. Gorobets O.Y., Derecha D.O. Quasi-periodic Microstructuring of Iron Cylinder Surface under its Corrosion under Combined Electric and Magnetic Fields // *Materials Science-Poland.* – 2006. – 24, – P. 1017–1025,
66. Ilchenko M.Yu., Gorobets O.Yu., Bondar I.A., Gaponov A.M. Influence of external magnetic field on the etching of a steel ball in an aqueous solution of nitric acid // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2010. – 322. – P. 2075–2080.
67. Gorobets S.V., Donchenko M.I., Gorobets O.Yu., Goyko I.Yu. Effect of a magnetic field on the etching of steel in nitric acid solutions // *Russian Journal of Physical Chemistry.* – 2006. – 80, № 5. – P. 791–794.
68. Gorobets S.V., Gorobets O.Yu., Brukva O.M. Periodic microstructuring of iron cylinder surface in nitric acid in a magnetic field // *Applied Surface Science.* – 2005. – 252/2. – P. 448–454.
69. Bar'yakhtar V.G., Gorobets Yu.I., Gorobets O.Yu. Velocity distribution in electrolyte in the vicinity of a metal cylinder in a steady magnetic field // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2004. – 272-276P3. – P. 2410–2412.
70. Gorobets Yu.I., Gorobets S.V. Formation of Stationary flows of liquid in vicinity of ferromagnetic packing in constant magnetic field. *Magneto-hydrodynamics.* – 2000. – 36, №1. – P. 75–78.